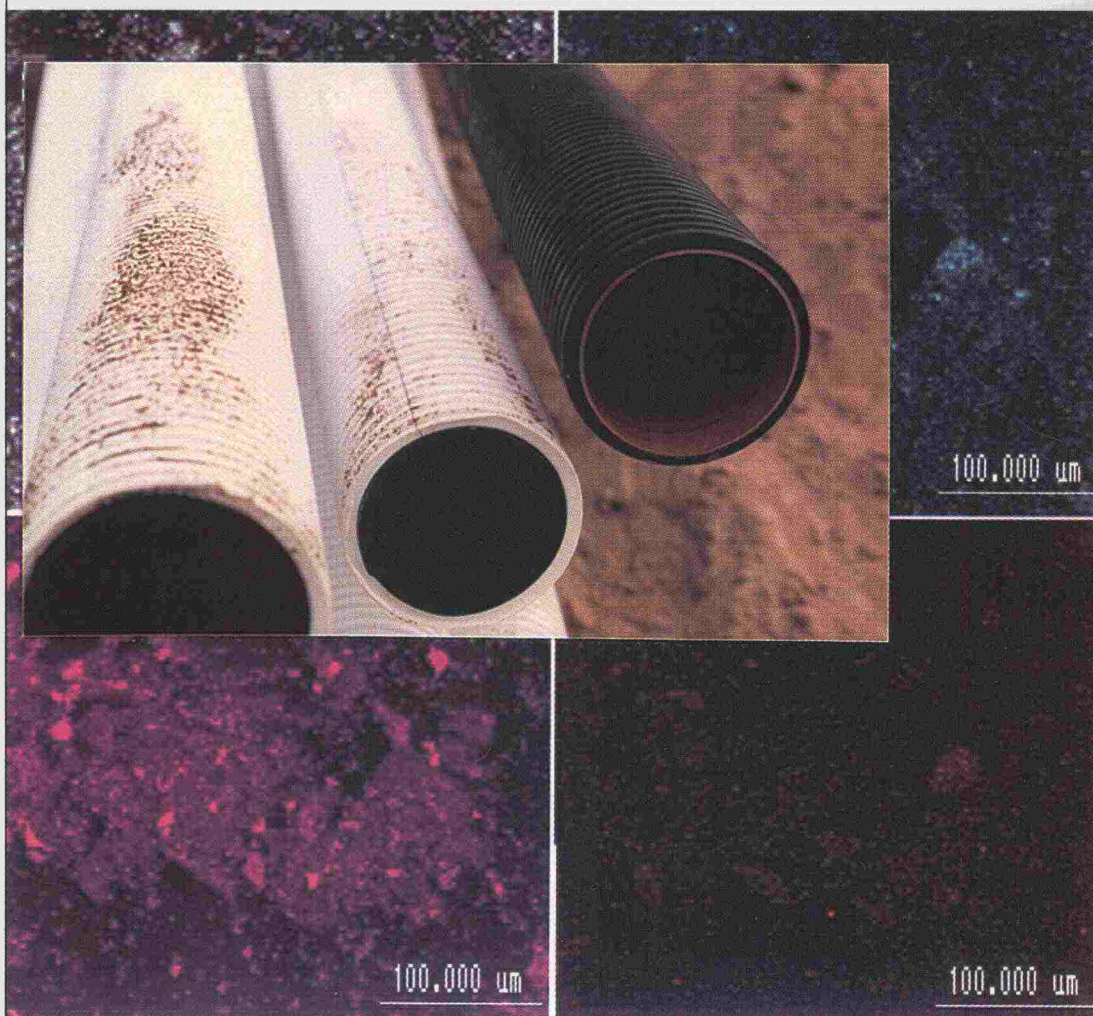




Tielaitos

Kaarlo Peteri - Kauko Kujala - Jukka Palko

Salaojan ympärysaineen vaikutus raudan saostumisessa



**Tielaitoksen
selvityksiä**

4/1994

Kuopio 1994

**Tuotannon
palvelukeskus**

Tielaitoksen selvityksiä
4/1994

Kaarlo Peteri - Kauko Kujala - Jukka Palko

Salaojan ympärysaineen vaikutus raudan
saostumisessa

1312



Tielaitos
Tuotannon palvelukeskus

Kuopio 1994

ISSN 951-47-8773-0
ISBN 0788-3722
TIEL 3200214

© 1994 Tielaitos
Offsetpaino L. Tuovinen KY
Kuopio 1994

Julkaisua saatavana:
Tuotannon palvelukeskus, Kuopio

Tielaitos

Tuotannon
palvelukeskus

Kirkkokatu 1
PL 1117
70 101 Kuopio
Puh. 971-199 760

1 Johdanto	3
<hr/>	
2 Raudanmuodostuksen perusteista	4
<hr/>	
2.1 Rautasaostuman muodostuminen	4
2.2 Ympärys- ja putkimateriaalit okrasaostuman ehkäisyssä	5
2.3 Ympärysmateriaalien hydrauliset ominaisuudet	5
2.4 Okranmuodostuksen riskialueet	6
3 Koejärjestelyt ja tutkimusmenetelmät	8
<hr/>	
3.1 Maastotutkimuskohteet ja -menetelmät	8
3.2 Laboratoriokokeet	10
3.2.1 Ympärys- ja putkimateriaalit	10
3.2.2 Salaojan mallikokeet	12
3.3 VT 4:n salaojakokeilu	14
4 Koetulokset ja tulosten tarkastelu	15
<hr/>	
4.1 Koekohteiden valinta	15
4.2 Ympärysmateriaalien ominaisuudet	16
4.2.1 Hydrauliset ominaisuudet	16
4.2.2 Raudan pidättäminen	18
4.3 VT 4:n salaojarakenteen toimivuus	23
5 Johtopäätökset	24
<hr/>	
6 Jatkotutkimukset	26
<hr/>	
6.1 Koerakenteet	26
6.2 Instrumentointi	26
6.2.1 Laholaisen leikkaus	26
6.2.2 Jepuan alikulku	30
6.3 Seurantamittaukset	30
7 Kirjallisuus	31
<hr/>	
8 Liitteet	32
<hr/>	

ALKUSANAT

Tämän selvityksen tarkoituksena on esitellä erilaisten salaojan ympärys- ja putkimateriaalien käyttäytymistä salaojan raudanmuodostusprosessissa. Erityisesti ympärysmateriaaleja on testattu raudanmuodostukselle alttiissa olosuhteissa. Tutkimukseen liittyi sekä laboratorio- että maastokokeita.

Selvityksen on tehnyt diplomityönsä pohjalta tekn. yo Kaarlo Peteri tielaitoksen tuotannon palvelukeskuksen Kuopion kehitysyksikön toimeksiannosta. Kuopion kehitysyksikön puolesta työtä on valvonut diplomi-insinööri Hannu Autio ja työtä ovat ohjanneet TkT Kauko Kujala ja FL Jukka Palko.

Kuopiossa helmikuussa 1994

Tielaitos, tuotannon palvelukeskus, Kuopio

1 Johdanto

Toimivat kuivatusrakenteet ovat tien kestävyys- ja liikenneturvallisuuden edellytys. Kosteustila vaikuttaa tien rakennemateriaalien lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin sekä maapohjan routivuuteen. Tierakenteen kuivatus hoidetaan sekä pinta- että syväkuivatuksena. Pintakuivatus voidaan toteuttaa avo-ojituksella, sadevesiviemäröinnillä ja eräissä tapauksissa imeyttämällä. Syväkuivatustapoja ovat avo-ojitus, suoto- ja salaojitus. Tieleikkauksien ja alikulkujen kuivatusjärjestelyt vaativat erityisesti syväkuivatuksen rakentamista silloin, kun leikkaukset tehdään pohjavesipinnan alapuolelle.

Pohjanmaan rannikkoalueilla, erityisesti Oulun ja Vaasan tiepiireissä, on havaittu kyseisten leikkausten ja alikulkujen salaojarakenteiden tukkeutumista. Salaojat ovat hoitamattomina tukossa jo 2-3 vuoden kuluttua rakentamisesta. Tukkeutuminen voi aiheutua raudan- eli okranmuodostuksesta ja/tai maa -aineen pääsystä salaojaputkeen. Okra muodostuu maaperän ja pohjaveden sisältämästä raudasta kemiallisen saostumisen ja mikrobiologisen bakteerikasvuston aiheuttamana.

Kunnossapidosta saatujen kokemusten perusteella paras keino okran poistamiseksi salaojista on niiden huuhtelu. Huuhtelut on kuitenkin tehtävä lähes vuosittain. Saostumisen on arveltu vähenevän huuhtelujen jälkeen, mutta ongelma ei kuitenkaan häviä. Varsinaiset salaojien hoito -ohjeet puuttuvat tiemestaripiireiltä.

Toimenpiteet saostumien ennalta ehkäisemiseksi kohdistuvat lähinnä erilaisten ympärysaineiden käyttöön. Rauta pyritään saostamaan kemiallisesti ennen sen joutumista pohjaveden mukana putkeen tai pitämään liukoisessa muodossa mahdollisimman pitkään. Eräillä ympärysaineilla voidaan estää myös rautabakteerien toiminta salaojaputkessa.

Tämä julkaisu on lyhennelmä opinnäytetyönä Oulun yliopistossa tehdystä diplomityöstä "Salaojan ympärysaineiden vaikutus okrasaostumien syntyyn", jossa tutkittiin salaojan tukkeutumista aiheuttavan okranmuodostuksen ehkäisemistä salaojan ympärysaineiden ja putkimateriaalien avulla. Aiheesta on tehty kirjallisuustutkimus tielaitoksen Kuopion kehitysyksikön toimesta (tielaitoksen julkaisu 60/1992), jonka perusteella edellä mainitun diplomityön käytännön toteutus on laadittu. Diplomityöhön liittyi myös tielaitoksen toimesta vuonna 1992 Oulun Pateniemeen rakennetun VT 4:n salaojakoerakenteen toimintaselvitys.

2 Raudanmuodostuksen perusteista

2.1 Rautasaostuman muodostuminen

Liukennemattoman rautaoksidihydraatin ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$) saostumista rautapitoisesta vedestä kutsutaan rauta- tai okrasaostumaksi. Pohja- ja ojavesissä sekä gravitaatiovedessä esiintyvä rauta on peräisin rautapitoisesta kiviaineksesta ja mineraaleista. Rauta vapautuu näistä kemiallisen rapautumisen tuloksena kun hapettumiselle otolliset olosuhteet - ilmastuminen, korkea redoxpotentiaali ja pH, ovat olemassa (Tielaitos 60/1992).

Luonnonolosuhteissa saostuma ei ole puhdasta rautaoksidihydraattisakkaa, vaan se koostuu useista tuotteista, se sisältää runsaasti mm. $\text{MnO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$:a, Al_2O_3 :a ja orgaanista ainesta. Okran sisältämä orgaaninen aines on tahmeaa ja kiinnittyy helposti kiinteisiin pintoihin ja samalla sitoo liukene-mattomia mineraaliyhdisteitä. Salaojituksen jälkeen osa muodostuneesta rautaoksidihydraatista kulkeutuu salaojaputkeen, johon muodostuu hyytelömäisiä limapisaroita. Limapisarat laajentuvat estäen vedenkulun salaojaputkessa. Tukkeuma syntyy ensiksi kohtiin, joissa imuojat yhtyvät kokoojajiksi. Uusi salaojitus voi tukkeutua kokonaan muutamassa vuodessa. Ojissa havaittava kellertävä tai punaisen ruskea sakka on myös okraa. Tuoreena tämä okra on rihmamaista ja kuivuttuaan siitä tulee puuterimaista, amorfista kiinteää ainetta (Tielaitos 60/1992).

Arviolta 10 - 20 % okraa on siihen tarttunutta savi- ja hiekka-ainesta. Saostuman orgaanisen aineksen määrä puolestaan vaihtelee 20 - 50 % välillä. Mikro-organismit osallistuvatkin okran muodostumiseen ja saostumiseen. Okran muodostuminen jaetaan kemialliseen ja mikrobiologiseen prosessiin. Kemiallinen okranmuodostus on hallitseva vasta ojitetuilla mailla, biokemiallinen okranmuodostus on pääasiallinen prosessi silloin, kun ojitus on vanhempi. Puhtaasti kemiallisesti muodostunut okra voidaan huuhtoa helposti salaojaputkistosta, biokemiallisesti muodostunut okra voi kiinnittyä tiukasti putkistoon bakteerieritteiden välityksellä (Tielaitos 60/1992).

Kemialliseen ja mikrobiologiseen raudanmuodostukseen salaojissa vaikuttavat maan pH:n, happiolosuhteiden ja lämpötilan lisäksi mm. maaperän ja salaojan ympärysaineen hydrauliset ominaisuudet, vedenpidätyskyky ja vedenläpäisevyys. Salaojien optimaalisen toiminnan kannalta ympärysaineen hydraulisten ominaisuuksien ja raudanpidätyskyvyn tulisi olla tasapainossa. Raudanpidättyminen ympärysaineeseen riippuu ilmeisesti aineen huokostilavuuden ja vedenläpäisevyyden suhteesta. Eri ympärysaineilla suhteet ovat erilaiset.

2.2 Ympärys- ja putkimateriaalit okrasaostuman ehkäisyssä

Okra muodostuu salaojaputkeen sekä kemiallisesti että mikrobiologisesti. Tämä mahdollistaa sen torjunnan kahdella eri tavalla

1 Edistämällä raudan hapettumista ja saostumista maassa

2 Estämällä saostuman muodostuminen ojassa ympärysaineiden avulla

Joidenkin ympärysaineiden virtausta pienentävä vaikutus tehostaa pohjavesien sisältämän liukoisen, kahdenarvoisen raudan hapettumista ja pidättymistä ympärysaineeseen. Myös salaojaputki voi toimia salaojarakenteessa virtausta hidastavasti. Hapettuessaan kahdenarvoisesta kolmenarvoiseksi rauta muuttuu liukoisesta kiinteäksi ja saostuu ympärysaineeseen. Ympärysaine voi myös reagoida kemiallisesti pohjaveden raudan kanssa ja pitää sen liukoisessa muodossa salaojaputkessa putkiston hapettavista olosuhteista huolimatta (esimerkiksi kompleksoimalla raudan kuten sahanpuru).

Okran kiinnittymisvoimakkuudet eri putkimateriaaleihin riippuvat putkimateriaaleista sekä putken sisäpinnan muodoista. Kiinnittymisvoimakkuudet muoviputkiin ovat yleensä suuremmat kuin tiiliputkiin. Ympärysaineiden ja putkimateriaalien valintaperusteita on käsitelty enemmän kohdassa 3.2.

2.3 Ympärysmateriaalien hydrauliset ominaisuudet

Salaojan toiminnan kannalta tärkeitä ympärysaineen hydraulisia ominaisuuksia ovat täysin ja osittain kyllästyneen tilan vedenläpäisevyydet sekä vedenpidätyskyky

Täysin kyllästyneen tilan vedenläpäisevyys

Ympärysaineen täysin kyllästyneen tilan (ympärysaine täysin veden kyllästämä) vedenläpäisevyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat rakeiden muoto, tehokas raekoko d_{10} , lajittuneisuus, huokoisuus ja suhteellinen tiiviys. Tielaitos (1993) on määritellyt salaojasoralle rakeisuuden ohjealueen, jonka perusteella salaojasoran ympärysaineen täysin kyllästyneen tilan vedenläpäisevyyden vaihteluväliksi voidaan määrittää 0.0003 ... 0.5 m/s. Tutkimuksessa ympärysaineiden valintaperusteena rakeisten materiaalien osalta käytettiin rakeisuuskäyrää, jonka tuli sopia rakeisuuden ohjealueeseen. Synteettiset ja orgaaniset materiaalit valittiin niiden vedenläpäisevyyksien perusteella, joiden tuli sopia yllä mainittuun vaihteluväliin.

Osittain kyllästyneen tilan vedenläpäisevyys

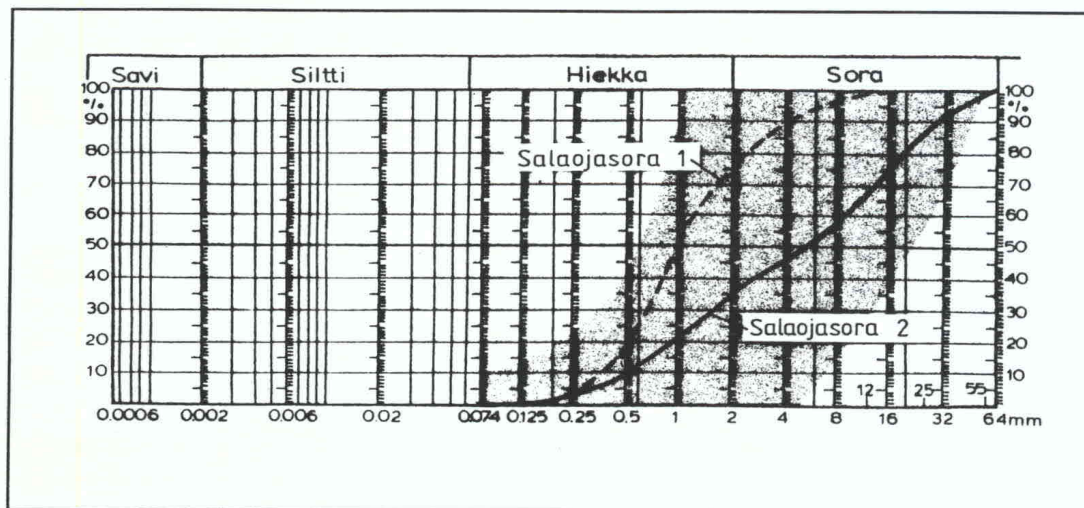
Salaojan ympärysaine on osittain kyllästyneessä tilassa (ympärysaine veden osittain kyllästämä) lähes koko rakenteellisen ikänsä ajan. Poikkeuksia ovat tilanteet, jolloin vedentulo normaalirakenteiseen salaojaan on voimakasta, kuten esimerkiksi keväällä sulamisvesien kyllästäessä maan. Upposalaojarakenteissa, joissa vesilukon avulla pidetään vedenpinta poistokaivoissa ylempänä kuin tuloputken suu, on salaojan ympärysaine

täysin kyllästyneessä tilassa. Osittain kyllästyneen tilan vedenläpäisevyyden määrittäminen on hankalaa - se on riippuvainen maa-aineksen kyllästystilasta. Maa, joka ei ole täysin vedellä kyllästettyä, ei johda lävitseen vettä yhtä runsaasti, kuin täysin vedellä kyllästynyt maa (Bouver 1978).

Vedenpidätyskyky

Vedenpidätyskyky ilmaistaan laboratoriomittauksilla saatavalla vedenpidätys- eli pF -käyrällä, joka kuvaa näytteeseen (maa-ainekseen) kohdistuvan paineen ja tilavuusvesipitoisuuden välistä vuorosuhdetta. Näytteeseen kohdistuva paine ilmaistaan pF-lukuna, jossa kirjain p kuvastaa suuren logaritmita luonnetta ja F tulee sanoista "free energy". Tilavuusvesipitoisuus ilmaisee prosentteina veden pitoisuuden koko maa-ainesnäytteessä.

Vedenpidättymiseen vaikuttavat maan lajitekoostumus (kuva 1) ja rakenne sekä sen sisältämä orgaanisen aineksen määrä ja laatu (Bear et al. 1987). Salaojan ympärysaineiden vedenpidätyskyky yhdessä vedenläpäisevyyden kanssa vaikuttavat raudan saostumiseen ympärysaineessa. Käytännössä on kysymys raudan hapettumisesta ympärysaineessa läsnä olevan hapen vaikutuksesta. Hapettumisprosessin tehokkuus riippuu mm. rautapitoisen veden viipymästä ympärysaineiden hapettavissa olosuhteissa.

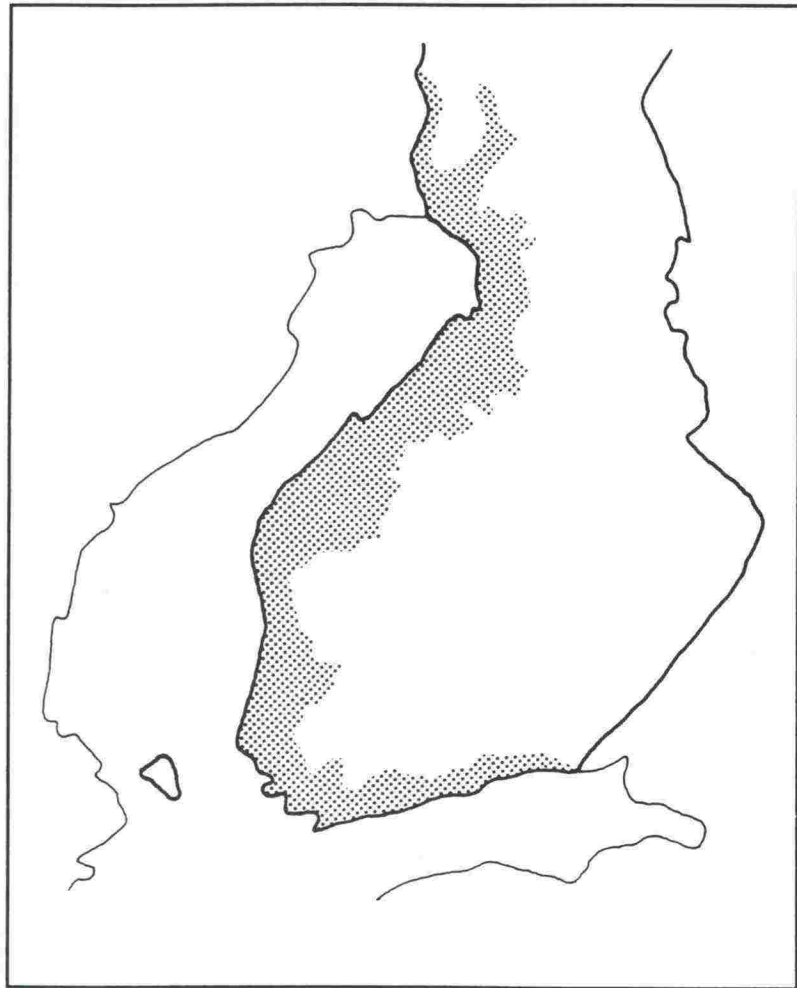


Kuva 1. Salaojasoran rakeisuuskäyriä. Rasteroitu alue kuvaa tielaitoksen salaojasoralle määrittelemää ohjealuetta. Salaojasora 1 on Vaasan tiepiirissä ja salaojasora 2 Oulun tiepiirissä käytettyä luonnonsoraa.

2.4 Okranmuodostuksen riskialueet

Okranmuodostuksen riskialueet Suomessa sijaitsevat rannikkoalueilla, etenkin Pohjanmaan rannikkoalueet ovat vanhaa merenpohjaa korkeustasolle 60 m merenpinnan yläpuolella. Tällä alueella sijaitsevat aikoinaan ns. Litorinameri, johon oli kerääntynyt mannerjään sulamisvesiä. Sulamisvesien mukana meren pohjaan sedimentoitui runsaasti eliömateriaalia ja sen mukana rautaa sekä rikkiä, jotka mineralisoituivat rautasulfidiksi. Kun näitä alueita ojitetaan, raudan ja happamuuden vapautuminen on voimakasta

(Tielaitos 60/1992). Vaasan ja Oulun tiepiirit sijaitsevat osittain näillä alueilla (kuva 2).



Kuva 2. Pohjanlahden rannikkoalueen happamat sulfaattimaat (Palko 1991)

Salaojituksen seurauksena vapautunut rauta kulkeutuu pohjaveden mukana salaojaputkistoon ja voi aiheuttaa salaojien tukkeutumista. Otollisimpia kohteita tukkeutumiselle ovat alikulut ja leikkaukset, jotka ovat pohjavesipinnan alapuolella. Tällaisissa kohteissa veden tulo leikkaukseen on voimakasta ja lisäksi vesi tulee syvältä maakerroksista, joiden redoxpotentiaali on negatiivinen ja maa-aines on hapanta. Diplomityössä "salaojan ympärysaineiden vaikutus okrasaostumien syntyyn" tutkittiin laboratoriokokein mahdollisuuksia ennalta ehkäistä salaojien tukkeutumista erilaisten salaojan ympärysaineiden avulla. Tukkeutumisprosessi on kuitenkin aikaa vaativa tapahtuma, joten ongelman tutkiminen onnistunee parhaiten maastoon tehtyjen koerakenteiden avulla. Diplomityöhön liittyikin laboratoriokokeiden lisäksi tutkimuskohteiden okranmuodostusherkkyyden kartoitus maastokairausten avulla, kohteiden valinta koerakentamiseen kairaustulosten perusteella, koerakenteiden suunnittelu sekä Vaasan että Oulun tiepiirien alueelle ja koepisteiden rakentaminen Oulun kohteeseen. Koerakentamiseen valittiin kaksi kuudesta tutkimuskohdevaihtoehdosta.

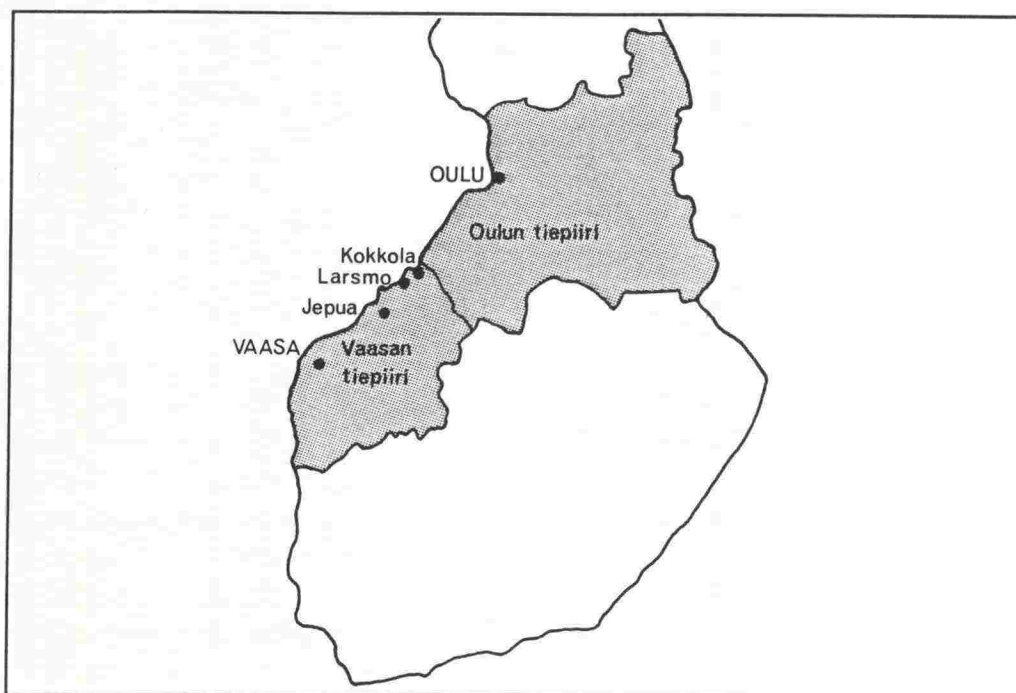
3 Koejärjestelyt ja tutkimusmenetelmät

3.1 Maastotutkimuskohteet ja -menetelmät

Tutkimuskohteet olivat tiepiirien osoittamia vaihtoehtoja. Koerakentamiseen valittiin vaihtoehdot, joiden okranmuodostusolosuhteita pidettiin okranmuodostuksen kannalta otollisimpana. Tutkimuskohteita Vaasan tiepiirin alueelta olivat

- 1 Rimmin alikulku
- 2 Holmin "
- 3 Närvilän leikkaus
- 4 Ventuksen alikulku
- 5 Jepuan alikulku

Oulun tiepiirin alueelta tutkimuksessa oli mukana ns. Laholaisen leikkaus. Tutkimuskohteista kolme sijaitsee Kokkolan kaupungin alueella (kohteet 1, 3 ja 4), yksi Larsmon kunnassa (kohde 2) ja yksi Uudessakaarlepyyssä (kohde 5) (kuva 3). Oulun tutkimuskohde sijaitsee Pateniemen kaupunginosassa.



Kuva 3. Tutkimuskohteiden sijainti Oulun ja Vaasan tiepiirien alueella

Rimmin alikulku on VT 8:n ali kesän -93 aikana rakennettu teräksinen alikulkutunneli, jonka läpi kulkee ainoastaan kevyt liikenne. Kohteessa suoritettiin profiilikairaus kahdessa pisteessä, joista toisessa redoxpotentiaalin muutosvyöhyke oli 1.7 metrin syvyydessä (liite 1a). Kuivatusrakenteissa on käytetty salaojaputkena kookoskuitupäällysteistä Veto-Tupla -salaojaputkea.

Närvilän leikkaus on noin 400 m pitkä, kolme siltaa alittava VT 8:lle tehty leikkaus, joka on syvimmillään noin 5 m. Leikkaus on salaojitettu koko pituudeltaan kummankin puolen tietä kahdella rinnakkain kulkevalla salaojaputkella. Rakenteet ovat noin kahdeksan vuoden ikäisiä. Pohjamaa on siltistä hiekkamoreenia. Mittauksissa redoxpotentiaalin muutosvyöhyke oli kummassakin kairauspisteessä 1.4...1.7 metrin syvyydellä (liite 1c).

Ventuksen alikulku on VT 13:n alittava teräsbetonirakenteinen kevyen liikenteen alikulkusilta. Alikulkuleikkauksen salaojitus on rakennettu ainoastaan alikulkusillan alle, muutoin leikkauksen kuivanapito on järjestetty pinta-kuivatuksena. Leikkaus oli kuiva, mutta ojien pohjalla oli havaittavissa okraa. Hapettuneen/pelkistyneen maakerroksen rajapinta oli jo 0.6...0.7 metrin syvyydessä (liite 1c).

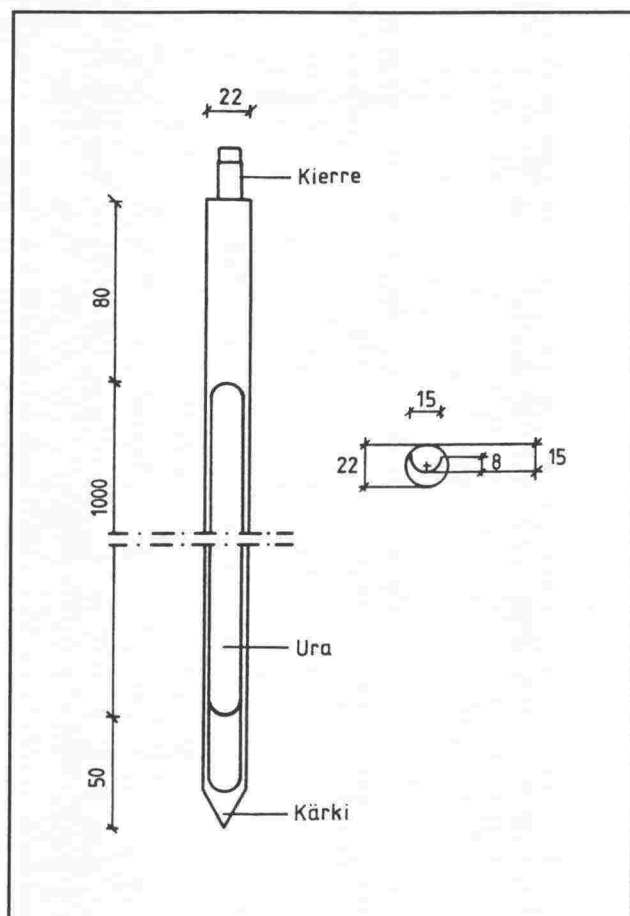
Holmin alikulku Larsmon kylässä oli myös tyypillinen teräsbetonirakenteinen kevyen liikenteen alikulku. Se on rakennettu Kokkolan ja Pietarsaaren välisen maantien n:o 749 ali. Paikalla sijaitsee pohjavesiesiintymä, josta on ollut ongelmia rakennusaikana. Leikkauksen kuivatus hoidetaan pumpaamon avulla. Salaojakaivoissa oli okraa, mutta salaojat toimivat vielä hyvin. Redoxpotentiaalin muutosvyöhyke oli noin 0.7 metrin syvyydessä (liite 1a).

Jepuan alikulku on Seinäjoen ja Kokkolan välisen rautatien Jepuan aseman kohdalla sijaitseva alikulkusilta, jonka rakennustyöt käynnistyivät syksyllä -93. Rautatien alittaa Jepuan - Lassfolkin maantie n:o 739. Kohteen maaperä on savea, joka vielä kairaushetkellä oli jäässä. Kairaukset suoritettiin paikalla, jossa maan routaantunut pintakerros oli poistettu aikaisemmin koneellisesti. Kairauspisteiden sijainti alikulkuun nähden käy ilmi liitteen 3 kuvasta. Redoxpotentiaalin muutosvyöhyke oli 1.6...2.0 metrin syvyydellä (liite 1b).

Laholaisen alikulku / leikkaus rakennettiin kesän -93 aikana. Se on Oulun ja Kemian välisen rautatien alittava, hiekkamaahan tehty leikkaus, jonka pituus on noin 400 m ja syvyys suurimmillaan 4 m. Rautatien alittaa Rannanperän ja Pateniemen kaupunginosien välinen Raitotie. Kairauspisteiden sijainti leikkauksessa on merkitty liitteen 4 kuvaan. Kairausajankohtana (toukokuu -93) oli leikkauksen tekeminen jo aloitettu, joten kairaukset tehtiin leikkauksen senhetkisen pohjan tasolta. Pohjavesipinta oli luonnontilassa ollut noin metrin syvyydellä maanpinnasta, mutta oli leikkaustyön yhteydessä alennettu leikkauksen pohjatason alapuolelle. Redoxpotentiaalin muutosvyöhyke havaittiin kummassakin kairauspisteessä (liite 1b).

Tutkimuskohteiden okranmuodostusherkkyyttä arvioitiin profiilikairausmenetelmällä (Palko 1991), jossa maaprofiilin irrottamiseen maasta käytetään syvällä uralla varustettua läpivirtauskairaa (kuva 4). Profiilista mitattiin maan redoxpotentiaali (Eh) ja pH. Mittaukset suoritettiin maastokäyttöön tarkoitettulla millivoltti/pH -mittarilla. Redoxpotentiaali kuvaa maaperän hapetus-/pelkistysvoimakkuutta, joka puolestaan kuvaa maaperän kahdenarvoisen (Fe^{2+}) ja kolmenarvoisen raudan (Fe^{3+}) suhdetta. Kairauksissa selvitettiin kairauspisteen maaprofiili redoxpotentiaalin ja pH:n funktiona. Maan pH- ja

Eh -arvojen perusteella arvioitiin maaprofiili, jossa okranmuodostus on voimakkainta (Tielaitos 60/1992). Lisäksi tutkimuspisteistä otettiin maanäytteet (3 kpl/kairauspiste), joista määritettiin laboratoriossa kokonaisrautapitoisuus ja maalaji.



Kuva 4. Maaperäkartoituksessa käytetty läpivirtauskaira (Palko 1991)

3.2 Laboratoriokokeet

3.2.1 Ympärys- ja putkimateriaalit

Laboratoriokokeisiin valittiin ympärysmateriaaleiksi:

- 1 masuunikuonamurske (0 -18 mm)
- 2 ferrokromikuona
- 3 masuunihiekka (granuli)
- 4 savi + CaO (kalsiumoksidi) -seos (savea 95 % ja kalsiumoksidia 5%)
- 5 sahanpuru (karkeata, männystä sahattua)
- 6 tupasvilla
- 7 suodatinvuorivilla (vahvuus 60 mm)
- 8 kalliomurske (6 -12 mm)
- 9 salaojasora (luonnonsora, vertailumateriaali).

Kuonamurske ja masuunihiekka olivat kemialliselta koostumukseltaan samaa Rautaruukki Oy:n Raahen tehtailla syntyvää kuonaa. Kuonamurske on ilmajäähdytettyä kuonaa, masuunihiekka valmistetaan jäähdyttämällä sula kuona vedessä. Masuunikuonan kemiallinen koostumus vaihtelee jonkin verran riipuen raaka-aineiden laadusta eri masuuneissa (SKJ -yhtiöt).

Ferrokromikuona oli Outokumpu Oy:n Tornion tehtailla syntyvää teräskuonaa. Sen valmistusprosessissa käytetään myös vesijäähdytystä. Tornion ferrokromikuona eroaa Raahen kuonasta kemialliselta koostumukseltaan ja väriltään (SKJ -yhtiöt).

Poltetun kalkin (CaO) lisäämisen ja sekoittamisen saveen on todettu lisäävän tehokkaasti saveen vedenläpäisevyyttä. Vedenläpäisevyys suurenee aina 7-10 % kalkinlisäykseen asti saveen lajitekoostumuksesta ja kemiallisista ominaisuuksista riippuen. Kalkinlisäys nostaa saveen pH:n suuremmaksi kuin 12, missä olosuhteissa kaikki rauta saostuu. Suotovesien pH vaihtelee välillä 10...12, missä olosuhteissa rautabakteerit eivät voi toimia.

Sahanpurun on arveltu pienentävän rautasaostumia lähinnä siksi, että puuaineksen orgaaniset hapot, etenkin tanniini, pyrkivät kompleksoimaan raudan ja estämään sen saostumisen salaojaputkessa. Tupasvilla sisältää humushappoja, jotka myös kompleksoivat tehokkaasti kaksiarvoista rautaa ja pitävät sen liukoisessa muodossa.

Suodatinvuorivilla on ominaisuuksiltaan erilainen kuin vastaavat lämmöneristeet. Se on hyvin vettäläpäisevää, kun taas eristevuorivilla tehdään voimakkaasti vettä hylkiväksi. Suodatinvuorivilla on käytetty pohjavesien raudanpoistossa ja havaittu ominaisuuksiltaan paremmaksi kuin hiekkasuodatin.

Salaojasoraa käytettiin vertailumateriaalina määritettäessä ympärysmateriaalien vedenläpäisevyyksiä ja raudanpidätyskykyä. Kalliomursketta käytettiin vertailumateriaalina mallikokeissa, joissa testattiin putkimateriaalien vaikutusta raudanpidättymiseen. Salaojaputkimateriaaleista mukana olivat muovi ja tiili sekä kookoskuidulla päällystetty muovisalaojaputki. Rakeisten materiaalien rakeisuuskäyrät ovat liitteillä 2a ja 2b.

Diplomityössä "Salaojan ympärysaineiden vaikutus okrasaostumien syntyyn" selvitettiin lisäksi erilaisten seosten salaojan suotovesien pH:ta nostavaa vaikutusta. Laboratoriossa testattiin seuraavia seoksia:

- 10 salaojasora 75% + kalkkikivi (CaCO₃) 25%
- 11 salaojasora 50% + masuunikuonamurske 50%
- 12 masuunikuonamurske 75% + kalkkikivi (CaCO₃) 25%
- 13 masuunikuonamurske 90% + rakeinen kalkki (CaO) 10%.

Salaojien toiminnan kannalta tärkeät hydrauliset ominaisuudet vedenläpäisevyys täysin ja osittain kyllästyneessä tilassa sekä vedenpidätyskyky määritettiin Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa.

Täysin kyllästyneen tilan vedenläpäisevyys määritettiin vakiopainekoelaitteistossa kuitenkin niin, että veden suodatus koekappaleiden läpi tehtiin muuttuvapaineisena koeteknisistä syistä johtuen. Vedenläpäisevyyden lisäksi vakiopainekokeessa koekappaleiden läpi suodattuneen veden Fe -pitoisuutta seurattiin kokeen ajan. Tiiviyn vaikutus vedenläpäisevyyteen ja raudanpidätyskykyyn määritettiin savi + CaO -seokselle ja sahanpurulle.

Osittain kyllästyneen tilan vedenläpäisevyydet määritettiin tensioinfiltrometrin avulla. Laite soveltuu käytettäväksi niin laboratoriossa kuin maastossakin ja sekä häiriintyneille että häiriintymättömille näytteille. Mittaus tapahtuu käytännössä lisäämällä osittain kyllästyneessä tilassa olevaan maahan vettä, kunnes maa-aines on riittävällä tarkkuudella täysin kyllästynyt (Harju - Autti 1993).

Tutkimuksessa arvioitiin vedenläpäisevyyden ja tilavuusvesipitoisuuden (maa-aineksen kyllästystilan) välistä suhdetta SEEP/W-ohjelmistoon kuuluvalla KCAL-tietokoneohjelmalla, joka perustuu Green & Coreyn 1971 tutkimuksessaan esittämään kaavaan. Arviointilaskelmat tehtiin pF-kokeessa saatujen vedenpidätysarvojen perusteella.

Vedenpidätyskyky määritetään yleensä poistamalla maasta vettä tietyllä paineella ja määrittämällä vesipitoisuus tasapainotilanteessa. Tutkimuksessa veden poisto ja siihen liittyvät mittaukset suoritettiin Oulun vesi- ja ympäristöpiirin aluelaboratoriossa painelevy- eli pF -laitteen avulla.

3.2.2 Salaojan mallikokeet

Salaojan ympärysaineiden ja putkimateriaalien kykyä estää okrasaostumien muodostumista tutkittiin mallikokein (kuva 5). Koe tehtiin viidelle ympärysaineelle ja kolmelle putkimateriaalille huoneen lämpötilassa ja laboratorioolosuhteissa. Koeastioita kasteltiin noin 3.5 kuukauden ajan rautapitoisella (rautapitoisuus 10 mg/l) vedellä. Tänä aikana vettä lisättiin kaikkiaan 78.5 l /malli. Salaojaputkessa vettä padotettiin siten, että putki oli koko ajan puoliksi veden täyttämä. Haihdunta estettiin pitämällä mallilaatikoita muovikalvolla peitettynä kokeen ajan. Mallikokeisiin valittiin seuraavat ympärysaineet:

- salaojasora
- savi + CaO -seos
- masuunikuonamurske 0 -18 mm
- sahanpuru
- kalliomurske 6 -12 mm

Tässä kokeessa mallinlaatikon salaojaputki oli muovia, halkaisijaltaan 50 millimetriä ja sisäpinnaltaan epätasainen.

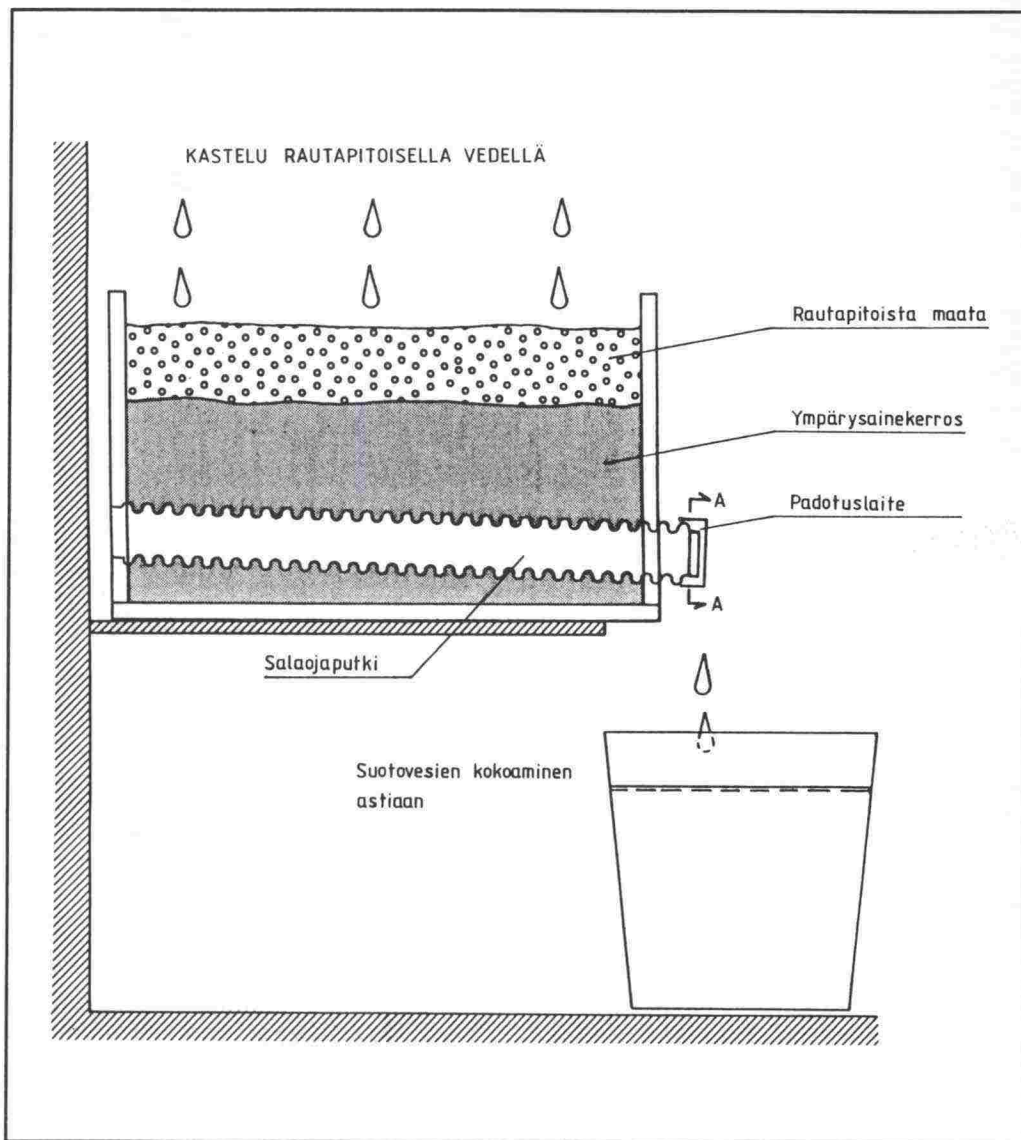
Salaojan ympärysaineiden vaikutus raudan saostumiseen salaojaputkessa

Koejärjestelyt ja tutkimusmenetelmät

Mallikokeissa testattiin myös kolmea putkimateriaalia:

- muovisalaojaputkea
- kookoskuidulla päällystettyä muovisalaojaputkea
- tiilisalaojaputkea

Tässä kokeessa salaojaputket olivat kalliomurskeella ympäröityjä.



Kuva 5. Mallikoejärjestelyiden poikkileikkauskuva

Salaojamallien läpi virranneen veden rautapitoisuutta ja pH:ta seurattiin kokeen ajan sekä pistokokein (kertanäytteet) että pitkällä aikavälillä (kokoomanäytteet). Kokeen lopussa sekä salaojaputkiin saostuneesta aineksesta että salaojaputkien pinnasta otettiin näytteet, jotka analysoitiin Oulun yliopiston elektronioptiikan laitoksella saostuman mineralogisen koostumuksen selvittämiseksi. Sakka analysoitiin röntgendiffraktometrillä (XRD) ja salaojaputkien pinnat pyyhkäiselektronimikroskoopilla (SEM) sekä sen yhteydessä olevalla energiadiispersiivisellä spektrometrillä (EDS).

3.3 VT 4:n salaojakokeilu

Oulun tiepiirin alueelle on vuonna 1992 rakennettu ferrokromikuonarakenne, jossa yhteensä noin 200 m:n matkalta on salaojasora korvattu Tornioista tuodulla Outokummun vesijäähdytyllä ferrokromikuonalla (kuva 6). Nämä kuonarakenteet ovat kahtena osana normaalirakenteiden välissä. Rakenne on toteutettu upposalaojana. Salaojitus on tehty sileäpintaisella muoviputkella (Veto-Tupla), osittain koolla 175/150 mm, osittain 117/100 mm:n putkella. Salaojaputkistot on huuhdottu kesällä -93.

Salaojat (ferrokromi/salaojasora) sijaitsevat tierakenteessa peräkkäin siten että toinen 100 metrin pituinen kuonaosuus on salaojalinjan päässä ja toinen (myös pituudeltaan 100 m) salaojasoraosuuksien välissä. Salaojavesien sekoittuminen eri osuuksilta tällaisessa rakenteessa on hyvin todennäköistä, joten vesinäytteiden ottoa ei katsottu tarkoitukselliseksi (kuva 6). Salaojarakenne on VT 4:n Pateniemen eritasoliittymän välittömässä läheisyydessä moottoritien välikaistalla (liite 5).



Kuva 6. VT 4:n salaojakoerakenteessa salaojasora korvattiin ferrokromikuonalla (kuva Hannu Autio)

4 Koetulokset ja tulosten tarkastelu

4.1 Koekohteiden valinta

Maaprofiilikairauksissa saatiin tuloksena kunkin kairauspisteen redoxpotentiaali (Eh) ja pH syvyyden funktiona (liitteet 1a, 1b ja 1c). Maanäytteiden rautapitoisuudet olivat keskimäärin noin 242 mg/kg maata. Näytteiden rautapitoisuuden vaihteluväli oli suuri, 8...1024 mg rautaa/kg maata.

Rimmin koepistettä 2 lukuunottamatta kairauksissa Eh pieneni kairaussyvyyden kasvaessa ja muuttui vähitellen negatiiviseksi kaikissa pisteissä. Kun lisäksi pH oli kahta poikkeusta lukuunottamatta (Holm 1 ja 2) kyseisillä syvyyksillä hapan, pääteltiin olosuhteiden olevan okranmuodostukselle otolliset Jepuan, Laholaisen, Närvilän, Rimmin ja Ventuksen koepisteiden ympäristössä.

Taulukko 1. Maaprofiilikairausten maanäytteiden vesiliukoisen raudan pitoisuudet. Raudanmääritys tehtiin vesiuuttomenetelmällä

Kairauspiste	Fe pitoisuuden vaihtelu (mg/kg maata)	Kairaussyvyys maan- pinnasta (m)
Laholainen 1	9.4 - 55.5	2.5 - 3.0
Laholainen 2	11.1 - 24.5	4.4 - 5.0
Jepua 1	308 - 1020	0.2 - 1.6
Jepua 2	652 - 992	1.0 - 2.0
Holm 1	8.9 - 10.5	0.5 - 0.9
Holm 2	79.3 - 518	0.6 - 0.8
Ventus 1	13.2 - 71.7	0.6 - 0.7
Ventus 2	25.6 - 65.5	0.3 - 0.7
Närvilä 1	16.4 - 59.3	1.4 - 1.6
Närvilä 2	19.6 - 60.7	1.5 - 1.7
Rimmi 1	17.0 - 1024	0.4 - 1.7
Rimmi 2	776	0.4 - 1.7

Maaperän rautapitoisuudet Jepualla vaihtelivat välillä 308...1020 mg rautaa/kg maata (taulukko 1). Jepualle oli myös mahdollista suunnitella erilliset koejärjestelyt, jotka eivät vaikeuta alikulun kuivatussuunnitelman mukaista salaojitusta. Näiden näkökohtien perusteella Jepuan alikulku valittiin Vaa-san tiepiiriin instrumentoitavaksi kohteeksi.

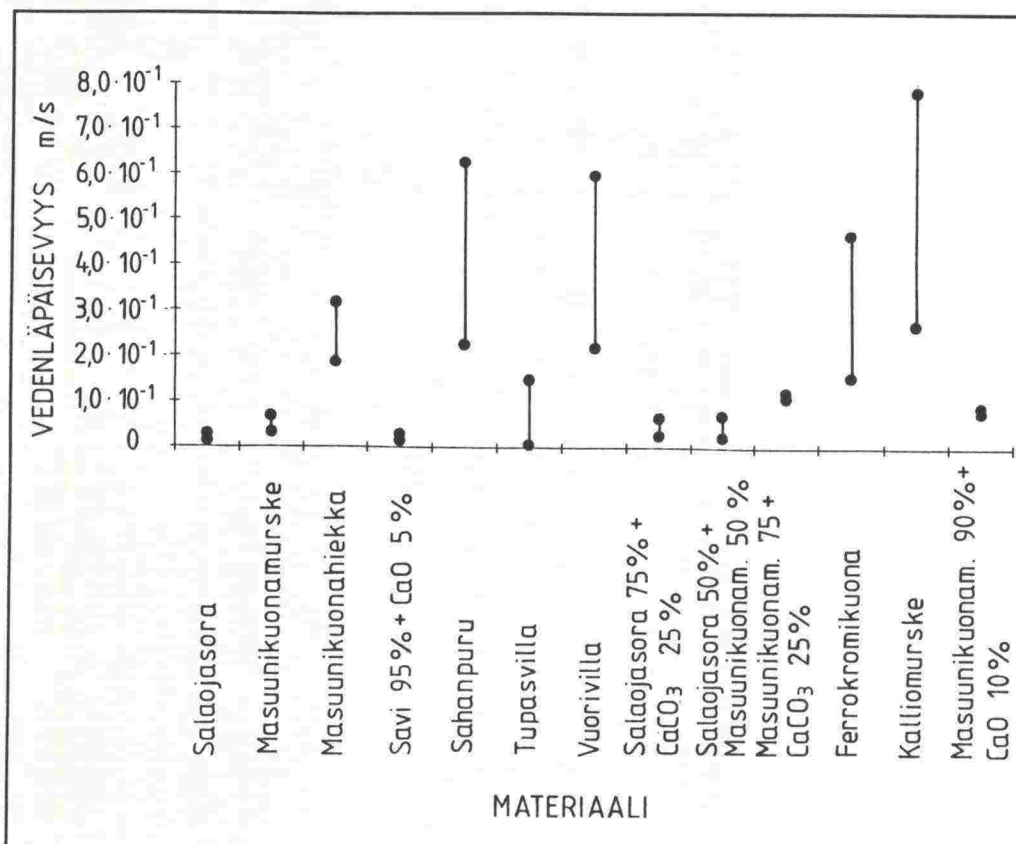
Oulun tiepiirin alueelle koerakenteet tehtiin Pateniemen kaupunginosaan Laholaisen leikkaukseen. Vaihtoehtoisia kohteita ei Oulun tiepiirin alueella ollut. Laholaisen leikkauksessa maanäytteiden rautapitoisuudet olivat pieniä (9.4...55.5 mg rautaa/kg maata, taulukko 1), mutta pH- ja Eh-olosuhteet olivat kuitenkin okranmuodostukselle sopivat (liite 1b). Voidaan olettaa, että liukoisen raudan pitoisuudet ovat korkeat alueen pohjavedessä. Tätä päätelmää näyttäisivät tukevan myös runsaat havainnot ojavesien ruosteenruskeasta väristä kyseisellä alueella.

4.2 Ympärysmateriaalien ominaisuudet

4.2.1 Hydrauliset ominaisuudet

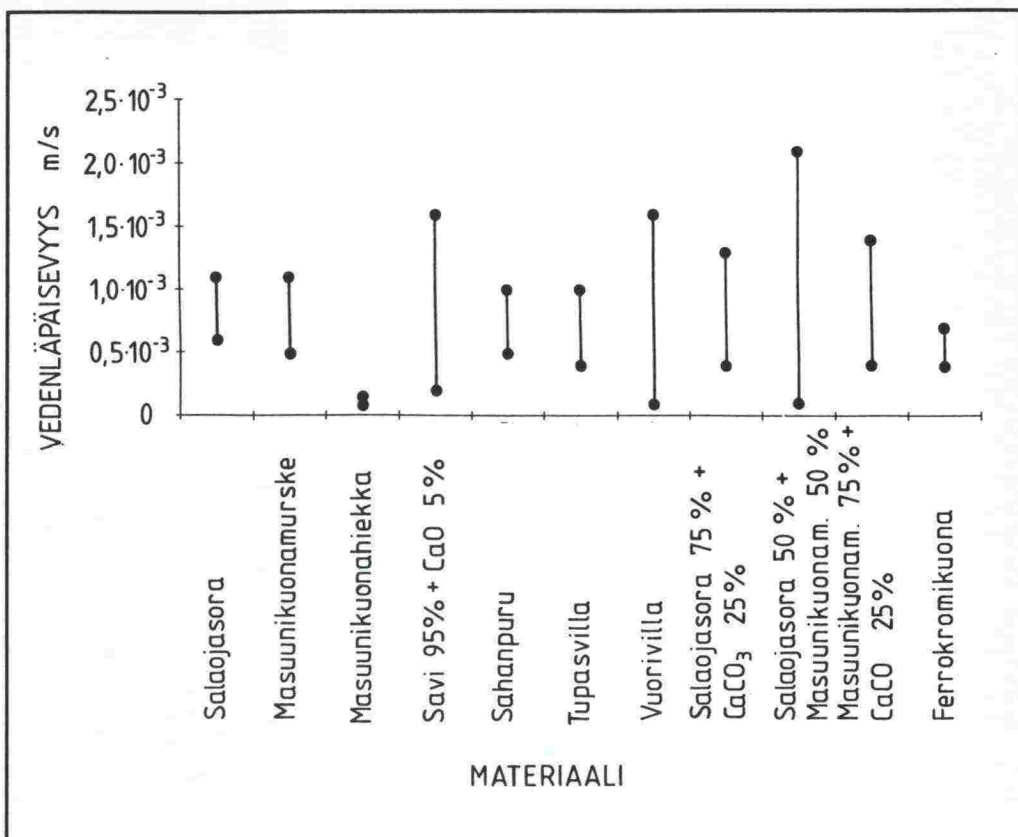
Vedenläpäisevyys kyllästystilan funktiona

Salaojan ympärysaineiden osittain kyllästyneen tilan vedenläpäisevyysarvot olivat täysin kyllästyneen tilan arvoja pienemmät (kuvat 6 ja 7). Kyllästystilan kasvaessa vedenläpäisevyys parani kunnes saavutettiin täysin kyllästyneen tilan vedenläpäisevyys.



Kuva 6. Täysin kyllästyneen tilan vedenläpäisevyydet vaihteluväleineen. Vaihteluväli muodostuu kolmen rinnakkaisen koekappaleen mittauksista.

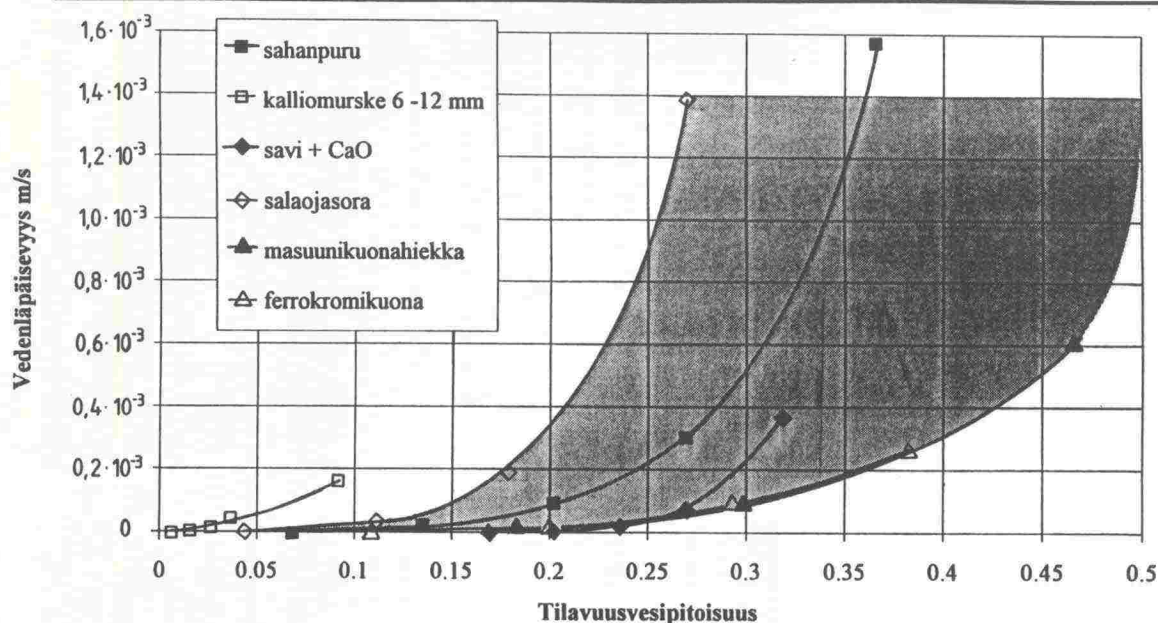
Vedenläpäisevyydet täysin kyllästyneessä tilassa olivat kaikilla materiaaleilla vähintään salaojasoran vedenläpäisevyyden luokkaa ($1,0 \dots 3,1 \times 10^{-2}$ m/s, kuva 6). Osittain kyllästyneessä tilassa kuonamurskeen, sahanpurun, tupasvillan, savi + CaO-seoksen, vuorivillan ja salaojasora + kuonamurske-seoksen keskimääräiset vedenläpäisevyydet olivat yhtä hyviä kuin salaojasoran (kuva 7). Muiden materiaalien vedenläpäisevyydet olivat keskimäärin salaojasoran vedenläpäisevyyttä pienempiä, mutta eivät merkittävästi salaojan toiminnan kannalta. Masuunikuonahiekan vedenläpäisevyys oli pienin osittain kyllästyneessä tilassa (kuva 7), mutta kasvoi voimakkaasti kyllästystilan kasvaessa (kuva 6).



Kuva 7. Osittain kyllästyneen tilan vedenläpäisevyydet vaihteluväleineen (tensiointilftrmetrimittaus). Vaihteluväli muodostuu viiden peräkkäisen mittauksen tuloksista.

Ympärysaineen kyllästystilan vaikutus vedenläpäisevyyteen on eri materiaaleilla hyvin erilainen (kuva 8). Ääritapauksia edustavat kalliomurske ja kuonamateriaalit. Kalliomurskeen vedenläpäisevyys oli jo pienissäkin vesipitoisuuksissa niin suuri (esimerkiksi tilavuusvesipitoisuudella 0.05 se oli 0.8×10^{-4} m/s ja salaojasoran 0.2×10^{-6} m/s), että raudanpidättymistä ei todennäköisesti ehtinyt tapahtua lainkaan. Kuonamateriaalit pidättivät vettä runsaasti ja raudanpidättäminen oli tehokasta (taulukko 4), mutta vedenläpäisevyys on pienillä vesipitoisuuksilla huonompi kuin salaojasoran (kuvat 7 ja 8).

Näyttäisikin siltä, että salaojan ympärysaineen raudanpidättymisen ja vedenläpäisevyyden suhde on optimaalisin kuonamateriaalien ja salaojasoran käyrien rajaamalla alueella (vrt. kuva 8 rasteroitu alue ja taulukko 4).



Kuva 8. Vedenläpäisevyydet kyllästystilan funktiona muutamilla ympärysaineilla. Arvot on laskettu SEEP/W ohjelmistoon sisältyvällä KCAL-tietokoneohjelmalla pF-kokeista saatuja tuloksia hyväksikäyttäen.

Harju-Autin (1993) mukaan masuunikuonahiekan sitoutuminen ei vaikuta sen vedenläpäisevyyteen. Sitoutuneelle ja sitoutumattomalle masuunihiekalle voidaan käyttää samaa vedenläpäisevyysarvoa.

4.2.2 Raudan pidättyminen

Mallikoetulokset

Mallikokeessa savi + CaO -seos ja masuunikuonamurske pidättävät rautaa tehokkaasti. Myös kalliomurske on tehokas raudan saostin (taulukko 2). Vakiopainekokeessa kalliomurske ei pidättänyt rautaa lainkaan (taulukko 4, s. 23). Mallikokeessa raudan voimakas saostuminen kalliomurskeeseen johtuu ilmeisesti salaojaputken veden virtausta hidastavasta vaikutuksesta, jolloin raudan hapettuminen ja saostuminen ympärysaineeseen ehtivät tapahtua. Sahanpuru pitää raudan liukoissa muodossa, jolloin rauta tulee suotoveden mukana salaojarakenteen läpi.

*Taulukko 2. Salaojamallien läpi suodattuneen veden rautamäärät. Kaste-
luveden mukana lisätty rautamäärä oli 785 mg jokaista mallilaatikkaa koh-
den.*

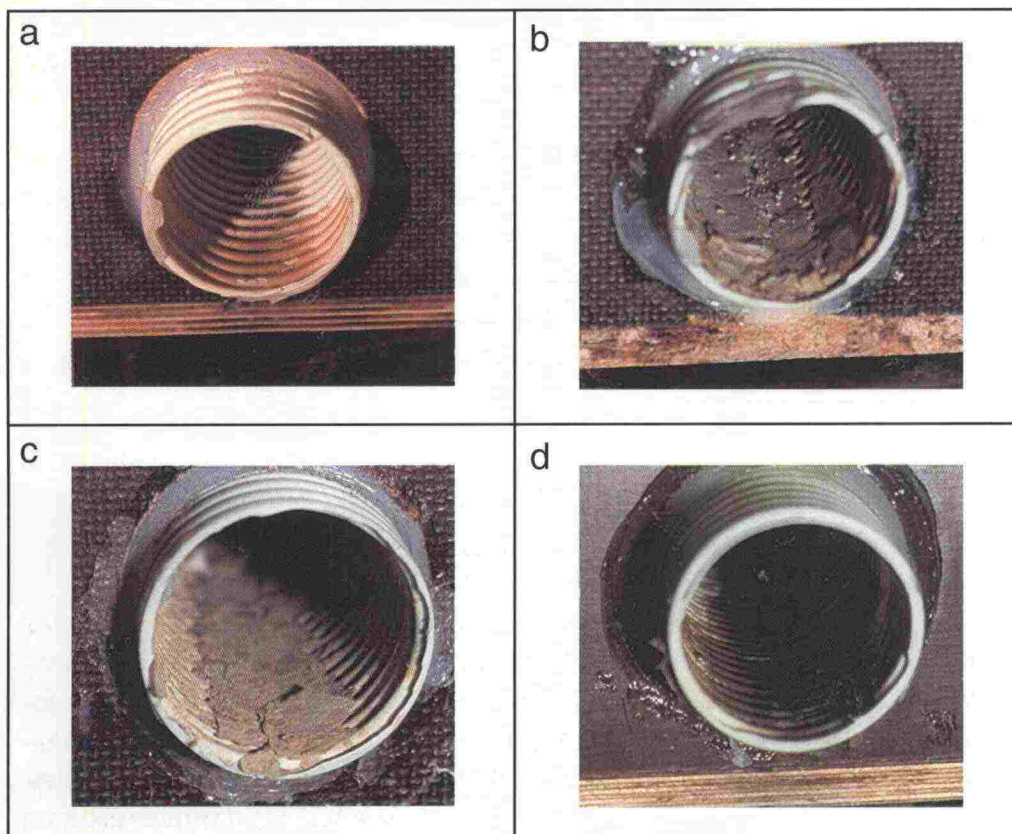
Ympärysaine / putkimateriaali	Läpitulut rauta / mg
salaojasora / muoviputki	42.4
savi + CaO / muoviputki	4.6
kuonamurske 0-18 mm / muoviputki	5.7
sahanpuru / muoviputki	86.4
kalliomurske / muoviputki	0.8
kalliomurske / kookoskuitupäällysteinen putki	71 **
kalliomurske / tiiliputki	0.9

** Rauta on mitattu laskeutumattomasta näytteestä, eikä ole
näin ollen vertailukelpoinen muiden materiaalien rautamäärien
kanssa

Mallien läpi johdettuihin salaojaputkiin keräytyneen saostuman määrät vaihtelevat materiaaleittain (taulukko 3). Savi + CaO -seoksen ja masuunikuo-
namurskeen suuri saostumamäärä on suurimmaksi osaksi valkeata, hel-
posti liukenevaa kalkkisakkaa (kuva 9). Kalliomurske/muoviputki-yhdistel-
mään kertynyt sakka on kalliomurskeesta ja kalliomurskeen päällä olleesta
maa-aineksesta irronnutta hienoainesta. Muiden putkien saostumamäärät
olivat niin pieniä, että niiden koostumusta ei silmämääräisesti voitu arvioida.

*Taulukko 3. Mallikokeessa putkiin kertyneen saostuman määrät putkimetriä
kohden*

Ympärysaine/putkimateriaali	Putkeen kertyneen saostuman määrä g/putkimetri
Salaojasora/muoviputki	9.09
Savi + CaO/muoviputki	66.39
Kuonamurske/muoviputki	44.3
Sahanpuru/muoviputki	7.6
Kalliomurske/muoviputki	36.1
Kalliomurske/kookoskuitupäällysteinen putki	20.22
Kalliomurske/tiiliputki	6.25



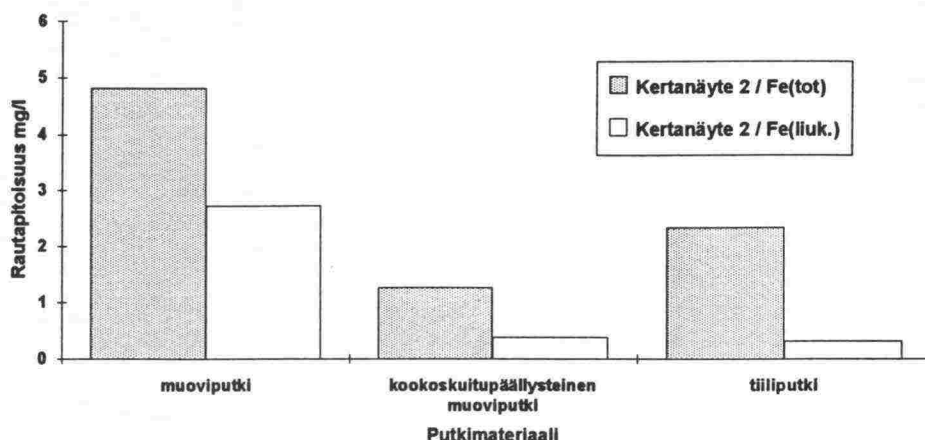
Kuva 9. Mallikokeen salaojaputkien purkupäät kokeen jälkeen.

a) salaojasora, b) savi + CaO -seos, c) masuunikuonamurske ja d) kalliomurske

Kaikissa putkissa saostuma putken sisäpinnalla oli löyhästi kiinnittynyttä ja helposti irroitettavissa. Leikattaessa koekappaleita elektronimikroskooppiko-keita varten saostumapinta lohkeili voimakkaasti. Mallikokeen aikana tapah-tuneet reaktiot olivat selvästi olleet pelkästään kemiallisia, mikrobiologinen toiminta olisi kiinnittänyt saostuman lujemmin putken pinnalle.

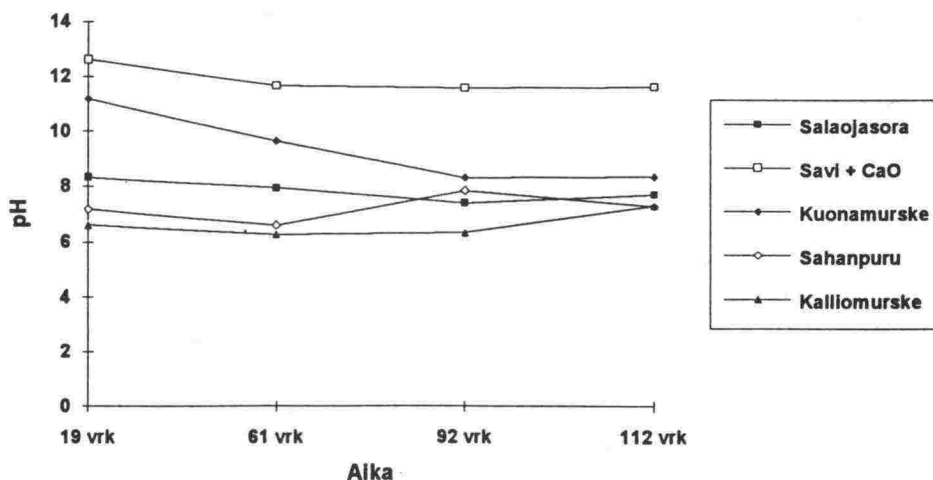
Kookoskuitu ja tiili vähensivät kalliomurskeen suotovedessä esiintyneen kahdenarvoisen raudan pitoisuuden noin kuudesosaan siitä määrästä, mitä muoviputken suotovesistä oli mitattu (2.7 mg/l, kuva 10). Ilmeisesti tiiliput-ken ja kookoskuidun vaikutus okrasaostuman syntyyn on suoraan verran-nollinen Fe^{2+} :n määrään suotovedessä eli se vähentää okranmuodostu-mista salaojaputkistoon verrattuna kalliomurske/muoviputki -yhdistelmään. Kertanäytteitä otettaessa mallit olivat 55 vrk:n ikäisiä.

Salaojan ympärysaineiden vaikutus raudan saostumiseen salaojaputkessa
Koetulokset ja tulosten tarkastelu



Kuva 10. Kertanäytteistä määritetyt mallikokeen suotovesien rautapitoisuudet. Fe(tot) on kokonaisrautamäärä ja Fe(liuk.) liukoisen raudan määrä näytteessä. Ympärysmateriaalina kokeessa oli kalliomurske (6-12 mm).

Mallikokeessa suotoveden pH pysytteli kullekin materiaalille tyypillisellä tasolla, suuria vaihteluita ei masuunikuonamursketta lukuunottamatta havaittu (kuva 11). Kuonamurskeen suotoveden pH laski voimakkaasti heti ensimmäisen mittauksen jälkeen ja asettui kokeen kestäessä tasolle 8.5. Myös sahanpurun pH-arvot vaihtelivat välillä 6.7...7.5. Putkimateriaalilla ei ollut vaikutusta suotoveden pH-arvoon.



Kuva 11. Suotoveden pH:n kehitys mallikokeen aikana

Mallilaatikoita avattaessa huomattiin salaojasoramalliin lisätyn raudan sulfidoituneen. Mallikokeen ympärysaineen hapensaanti oli estynyt padotusjärjestelyiden ja haihdunnan estämiseen käytetyn muovin vaikutuksesta, joten kasteluvedessä ollut sulfaattimuotoinen (FeSO_4) rauta oli pelkistynyt sulfidiksi (FeS). Tällöin kemiallinen okranmuodostus ei ole ollut kovinkaan tehokasta mallikokeen aikana. Lisäksi koeteknisistä syistä johtuen kokeeseen käytetty aika jäi lyhyeksi.

Vakiopainekoetulokset

Vakiopainelaitteiston läpi suotautuneesta vedestä savi + CaO, kuonamurske, tupasvilla sekä erilaiset seokset lukuunottamatta salaojasoran + CaCO_3 :n seosta saostivat raudan lähes sataprosenttisesti. Pieniä määriä rautaa pääsi läpi kuonahiekasta (taulukko 4).

Muut materiaalit läpäisivät vaihtelevia määriä rautaa. Sahanpuru, vuorivilla ja kalliomurske eivät pidättäneet sitä käytännöllisesti katsoen lainkaan. Nämä materiaalit olivat myös niitä, joiden läpi vesi suodattui nopeasti. Raudan pidättymisen kannalta ei liian suuri vedenläpäisevyys ole suotavaa. Suositeltava arvo on kuitenkin materiaalienkohtainen (kuva 8).

Salaojasora saosti rautaa hyvin. Näyttäisi kuitenkin siltä, että rautaa pidättyy salaojasoraan vain tiettyyn kyllästymispisteeseen saakka, jonka jälkeen sitä alkaa irrota suotoveteen, koska kokeen lopussa otetun kertanäytteen rautapitoisuus oli korkeampi kuin kokeen kestäessä kerätyn kokoomanäytteen (taulukko 4). Raudan irtoamista tapahtui siis näinkin lyhytkestoisessa kokeessa. Ilmeisesti toimintamalli maastossa on sama. Myös salaojasora + CaCO_3 -seoksessa oli sama ilmiö havaittavissa.

Masuunikuonamurskeen ja -hiekan rautaa saostava vaikutus perustuu ilmeisesti niissä olevan CaO:n läsnäoloon. Sahanpuru pitää raudan liukoisessa muodossa, jolloin suurin osa raudasta suotautuu ympärysaineen läpi (taulukko 4).

Ferrokromikuona pidatti raudasta noin 70% ja loppu suotautui salaojarakenteen läpi. PH:n vaihteluväli oli suuri (taulukko 4). Hapettumisreaktio ferrokromikuonassa ei ilmeisesti ollut niin tehokas kuin masuunikuonamurskeessa ja -hieassa. Tähän oli syynä pH:n alhaisempi arvo.

Taulukko 4. Vakiopainekokeen pH ja rautapitoisuudet. Taulukossa arvo 0.005 mg/l kuvaa pienintä käytetyllä menetelmällä (SFS 3028) määritettävissä ollutta rautamäärää.

Materiaali	pH:n vaihteluväli	Rautapitoisuus (mg/l) kokoomanäyte	Rautapitoisuus (mg/l) kertanäyte
Salaojasora (luonnonsora)	6.3 - 7.0	1.5	3.4
Kuonamurske 0-18 mm (ilmajäähdytetty)	6.9 - 9.6	0.1	< 0.005
Masuunihiekka (vesijäähdytetty)	10.4 - 10.8	0.4	0.2
Savi 95%+ CaO 5%	11.9 - 12.0	< 0.005	< 0.005
Sahanpuru (mänty)	5.0 - 5.6	9.2	8.4
Tupasvilla	5.7 - 6.9	0.2	0.1
Vuorivilla	5.6 - 6.0	10.2	9.9
Ferrokromikuona (vesi- jäähdytetty)	7.0 - 8.7	3.5	2.9
Kalliomurske 6-12 mm	5.5 - 6.7	11	9.9
Salaojasora 75% + CaCO ₃ 25%	7.5 - 7.9	0.5	1.8
Salaojasora 50% + kuona- murske (0-18 mm) 50%	10.4 - 10.6	0.1	0.2
Kuonamurske (0-18 mm) 75% + CaCO ₃ 25%	7.6 - 7.9	0.1	0.3
Kuonamurske (0-18 mm) 90% + rakeinen CaO 10%	12.4 - 12.5	0.3	0.1

4.3 VT 4:n salaojarakenteen toimivuus

Koska salaojarakenne sijaitsee keskeisellä ja vilkasliikenteisellä paikalla, sen aukaisua rakenteen toiminnan tarkistamiseksi ei voitu tehdä. Salaojakaivot tarkistettiin silmämääräisesti. Salaojakaivoissa oli havaittavissa okrasaostumaa jonkin verran niin ferrokromikuonalla kuin salaojasorallakin (seulottu lajike) tehdyissä ratkaisuiissa. Lisäksi ferrokromikuonaosuudelta tulevien putkien päissä ja kaivoissa oli havaittavissa runsaasti kellertävää vaahtoa.

Jatkossa salaojarakenteen toiminnan seuraamiseksi ja näytteiden vertailukelpoisuuden varmistamiseksi näytteenotto tulisi järjestää huuhtelukertojen yhteyteen esimerkiksi siten, että neljä tuntia huuhtomuksen jälkeen (Olsen Grant & Andersen, 1985) sekä salaojasoralla että ferrokromikuonalla ympäröidyn salaojaputken suuhun asennetaan suodatinastia tai -sukka. Suodatinastian/-astian annetaan olla paikallaan vuorokauden ajan. Suodattimeen

jää tuon vuorokauden aikana suotovesien mukana kulkeutuva rauta. Suodoksesta määritetään Fe^{3+} -pitoisuus. Peräkkäisistä raudanmäärityksistä voidaan arvioida rakenteen toimivuutta yleensä ja salaojasora ja ferrokromirakenteiden eroja raudanpidätyksen suhteen.

5 Johtopäätökset

Maaprofiilikairaustulosten perusteella Vaasan tiepiirin koerakennuskohdeeksi valittiin Jepua. Tutkimuskohteen maanäytteet osoittivat maaperän rakennuspaikalla hyvin rautapitoiseksi. PH- ja redoxmittausten perusteella kohteen okranmuodostusherkyys on suuri. Oulun koerakenteet tehtiin Laholaisen leikkaukseen.

Kaikkien ympärysmateriaalien täysin kyllästyneen tilan vedenläpäisevyydet olivat suurempia kuin salaojasoralla. Osittain kyllästyneessä tilassa kuonamurskeen, sahanpurun, tupasvillan, savi + CaO-seoksen, vuorivillan ja salaojasora + masuunikuonamurske-seoksen vedenläpäisevyydet olivat suuruudeltaan samaa luokkaa kuin salaojasoran. Muut materiaalit olivat vedenläpäisevyydeltään keskimäärin hieman huonompia, mutta eivät merkittävästi salaojan toiminnan kannalta.

Tehokkain raudan saostaja salaojan ympärysainemateriaalina on savi + CaO -seos. Se poistaa raudan suotovedestä täysin. Lisäksi suotoveden pH pysyy korkealla, jolloin mikrobiologinen toiminta salaojaputkistossa estyy. Savi + CaO -seoksen teho raudan saostajana perustuu materiaalin emäksisyyteen ($\text{pH} > 10$), jolloin rauta saostuu. Koetulosten perusteella näyttäisi siltä, että savi + CaO-seoksen vedenläpäisevyyden ja raudanpidätyksen suhde on hyvä okrasaostuman muodostumisen ehkäisemiseen salaojissa. Rakenteen pitkäaikaisen toimivuuden varmistaminen vaatii savi + CaO -seoksen jatkotutkimusta maastossa (koerakenne).

Kuonamateriaalit ovat varteenotettava vaihtoehto salaojan ympärysaineeksi okranmuodostukselle herkillä alueilla. Masuunikuonamursketta parempi vaihtoehto salaojan ympärysaineeksi on masuunihiekka. Vedenläpäisevyydeltään hieman heikompana ja raekooltaan pienempänä se pienentää suotoveden nopeutta ympärysaineessa verrattuna kuonamurskeeseen. Tällöin kuona reagoi suotoveden raudan kanssa tehokkaammin ja samalla kuonahiekasta liukenee enemmän emäksisyyttä sen läpi virtaavaan veteen. Näin masuunihiekan suotovesien rautapitoisuudet salaojarakenteessa ovat todennäköisesti alhaisemmat kuin kuonamurskeella ja suotovesien pH -arvot korkeammat.

Ferrokromikuona päästää noin 70% liukoisesta raudasta lävitseen ja 30 % pidättyy itse materiaaliin. Materiaalin toiminta voi olla hyvä salaojan ympärysaineen tukkeutumisen estämiseksi pitemmällä aikavälillä. Raudan saostumisen vaikutus kuonamateriaalien toimintaan pitemmällä aikavälillä (mm. ympärysaineen tukkeutumisen tutkiminen ja pH:n kehittyminen) vaatiivat niiden tutkimista *in situ*. Masuunihiekan sitoutuminen ei vaikuta sen vedenläpäisevyyteen merkittävästi.

Kalliomurske saostaa rautaa hyvin, kun veden virtaus saadaan hidastettua raudan saostumiseen sopivalle tasolle. Saostuminen johtuu kalliomurskeen suuresta ilmatilasta (rakeisuus 6-12 mm), eikä ilmeisesti ole yhtä tehokasta pienemmillä rakeisuuksilla (esimerkiksi 0-6 mm), joiden ilmatila on vastavasti pienempi.

Kookoskuidun raudan saostamisteho perustuu huokosten suureen määrään kookoskuitupäälysteessä. Kalliomurske/kookoskuitupäälysteinen putki -yhdistelmä (samoin kuin Vaasan tiepiirissä käytetty salaojasora/kookoskuitupäälysteinen putki -yhdistelmä) saostavat raudan kookoskuitupäälysteen pinnalle, joten systeemin pitempiaikainen toiminta (mm. runsaan raudan saostumisen aiheuttama tukkeutumavaara) vaatii jatko-tutkimuksia.

Kalliomurske/tiilisalaojaputki -systeemin kahdenarvoisen raudan määrät suotovedessä olivat huomattavasti pienempiä kuin kalliomurske/muoviputki yhdistelmän suotoveden Fe^{2+} -pitoisuudet. Ilmeisesti tiiliputken vaikutus okrasaostuman syntyyn on verrannollinen Fe^{2+} :n määrään suotovedessä eli se vähentää okranmuodostumista salaojaputkistoon verrattuna kalliomurske/muoviputki -yhdistelmään. Systeemin pitempiaikaisen toiminnan selvittäminen vaatii samoin jatkotutkimuksia maastossa.

Salaojasora saostaa rautaa hyvin verrattuna muihin koemateriaaleihin. Toisaalta sen suotovesien pH on alhainen, joten mikrobiologinen okranmuodostus salaojasoralla ympäröidyssä putkessa on todennäköinen.

Sahanpuru pitää raudan liukoisessa muodossa myös salaojaputkessa, jolloin raudan kemiallinen saostuminen putkistoon on vähäistä, mutta suotoveden pH on niin alhainen, että se ei estä mikrobien toimintaa salaojaputkistossa. Tällöin okran muodostuminen putkistoon on todennäköistä, mutta vaatii muodostuakseen pitemmän ajan kuin salaojasoralla.

Lyhytkestoisessa vakiopainekokeessa tupasvilla pidatti rautaa paremmin kuin salaojasora, mutta ei muuttanut suotoveden pH:ta. Tupasvillan vedenläpäisevyyden ja raudanpidättymisen suhde näyttäisi olevan samaa luokkaa kuin savi + CaO-seoksella. Suodatinvuorivilla ei pidättänyt rautaa lainkaan.

Erilaisilla yhdistelmäateriaaleilla pyrittiin nostamaan salaojasoran tai kuonamurskeen pH tasolle, jolla mikrobitoiminta salaojaputkessa olisi epätodennäköistä. Salaojasoran pH nousi ja raudan pidättyminen tehostui selvästi kuonamurskeen lisäyksen jälkeen. Kuonamurskeen pH nousi CaO-lisäyksen jälkeen. Nämä yhdistelmät voivat olla varteenotettavia vaihtoehtoja etsittäessä salaojasoran korvaavaa ympärysainetta.

Oulun koerakenteen vertailuympärysaineeksi valittiin salaojasora ja koemateriaaleiksi savi + CaO-seos, masuunihiekka ja ferrokromikuona. Putkimateriaaliksi Laholaisen leikkaukseen valittiin sisäpinnaltaan sileä muoviputki.

6 Jatkotutkimukset

6.1 Koerakenteet

Salaojien okranmuodostus on pitkäaikainen prosessi. Kemiallinen samoin kuin biokemiallinen okranmuodostus vaativat kehittyäkseen oikeanlaiset olosuhteet salaojaputkistoon. Ilmiön tutkiminen laboratorio-olosuhteissa ei anna siitä täysin oikeata kuvaa, koska kaikkia prosessiin vaikuttavia tekijöitä ei pystytä mallintamaan. Lisäksi virhemahdollisuudet ovat suuret pieniä vesi- ja maamääriä käsiteltäessä. Tutkittaessa prosessia maasto-olosuhteissa pystytään saamaan oikeat tekijät vaikuttamaan okranmuodostustapahtumaan yksinkertaisesti valitsemalla maastoltaan ja olosuhteiltaan oikean tyyppinen kohde koerakentamiseen.

Tierakenteen salaojituksen koerakentamisessa tärkeimpiä huomioon otettavia seikkoja ovat kohteen olosuhteet okranmuodostukselle, rakentamisaiakataulu, työmaajärjestelyt ja työmaan informointi sekä hankkeen kustannukset. Tässä tutkimuksessa koerakenne tehtiin niin, että siitä ei ollut haittaa työmaan muulle toiminnalle. Työmaata ja rakennesuunnittelijaa informoitiin hyvissä ajoin ennen rakentamisen alkua esittelemällä hankkeen instrumentointisuunnitelma.

Tehdyssä koerakenteessa kiinnitettiin erityisesti huomiota siihen, että koe-tulokset eri koemateriaalien osalta ovat vertailukelpoisia keskenään ja mittaukset helposti tehtävissä. Salaojalinjastojen suotovedet erotettiin toisistaan rakentamalla erityinen poistoviemäri varsinaisen salaojarakenteen rinnalle. Koerakenteen mittalaitteisto asennettiin niin, että seurantamittaukset ovat vaivattomasti tehtävissä.

6.2 Instrumentointi

6.2.1 Laholaisen leikkaus

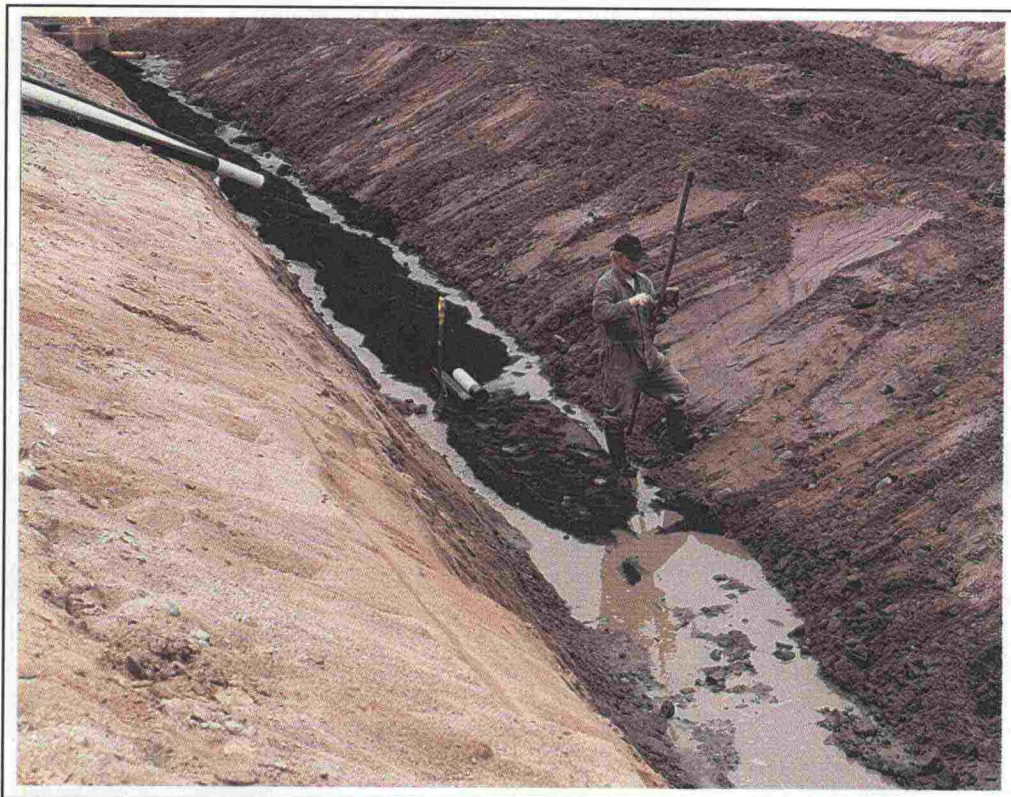
Oulun Pateniemeen rakennettuun rautatien alikulkuun tehtiin koerakenne, joka muodostuu kahdesta rinnakkaisesta tierakenteen sivulla sijaitsevasta salaojalinjasta. Koealueella, jonka pituus on noin 200 m, on tutkittavia ympäryksineitä yhteensä kuudella kaivovälillä. Koejärjestelyt on tehty siten, että kukin kaivoväli on oma kokonaisuutensa, erillään muista kaivoista tulevasta suotovesistä (liite 6). Tämä on voitu järjestää rakentamalla salaojalinjan viereen kokoojalinja, johon salaojalinjastoon suotautuvat vedet johdetaan.

Koealueen salaojitus tehtiin rakenteen kuivatussuunnitelman mukaisesti lukuunottamatta muutosta, jolla suunniteltu upposalaojarakenne saatettiin normaalirakenteiseksi salaojaksi, jossa hapen pääsyä putkeen ei ole estetty. Lisäksi rakenteeseen lisättiin edellä mainitut kokoojaviemärit estämään eri ympäryksineiden läpi suotautuvien vesien sekoittuminen.

Koealueella salaojaputkena käytettiin kuivatussuunnitelman mukaista muovista Veto-Tupla -salaojaputkea, joka oli halkaisijaltaan 117/100 mm. Kokoojaviemäri tehtiin vastaavankokoisesta umpinaisesta muoviputkesta (kuva 13). Kaivantoa täytettäessä myös kokoojaviemäri peitettiin ympärysaineella. Kaikenkaikkiaan käytetyn ympärysaineen määrä oli noin $0.5 \text{ m}^3/\text{salaojametri}$.



Kuva 12. Oulun Pateniemen koealueen yleisnäkymä itään. Etualalla salaojan ympärysaineena masuunikuonahiekka



Kuva 13. Salaojan ja kokoojaviemärin asennus kaivantoon Oulun koealueella. Salaojan ympärysainemateriaalina kuvassa on ferrokromikuona.

Koerakenteessa salaojien pituus vaihteli 30 - 48 m:n välillä riippuen salaojan sijainnista. Esimerkiksi kaivovälin 95 - 98 salaojan pituus on 48 m ja kaivovälillä 91 - 93 se on 30 m (liite 6).

Koerakenteen mittausinstrumentit asennettiin ympärysainekerrokseen. Instrumentointi tehtiin salaojitustyön aikana. Yksi mittauspiste koostui seuraavista mittausyksiköistä (kuva 15 a ja 15 b):

1 kpl kosteuselektrodi

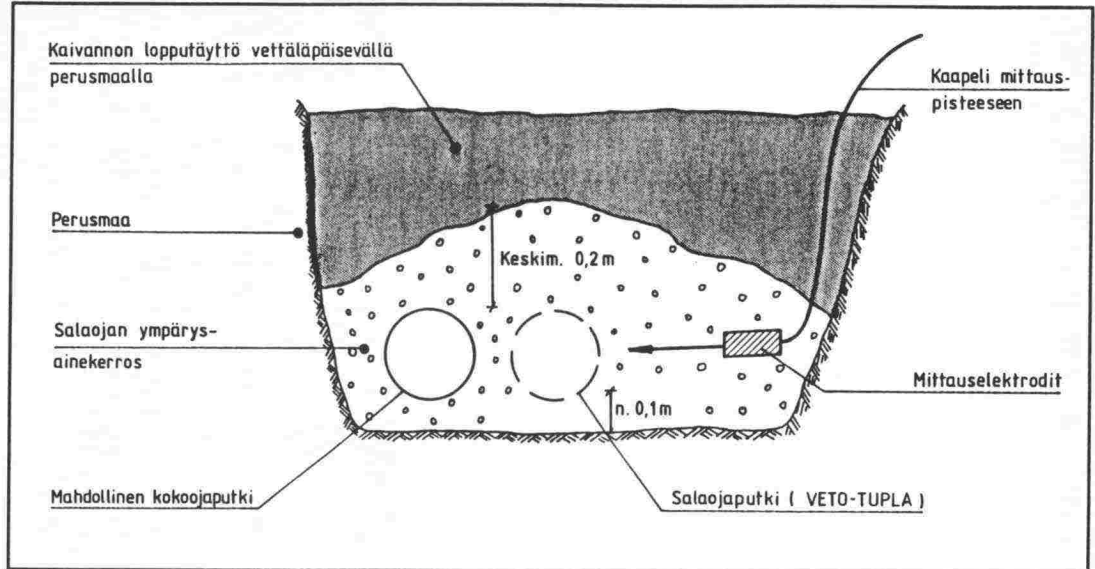
1 kpl lämpöanturi

1 kpl Redox-elektrodi

Elektrodit asennettiin lähes vaakasuoraan salaojaputken keskikohdalle noin kolmen metrin päähän salaojalinjan kaivosta (kuva 14). Mittauselektrodit asennettiin salaojaputken ulkopuolelle siten, että niiden kärkiosa tuli 40...50 mm:n päähän salaojaputken pinnasta ja peitettiin salaojan ympärysmateriaalilla. Elektrodien keskinäinen etäisyys oli noin 0.5 m. Koealueelle rakennettiin kolme mittauspistettä.

Mittauspisteitä koerakenteeseen tehtiin seuraavasti: salaojasoratäyttöön kaivovälille 92 - 96, ferrokromikuonatäyttöön kaivovälille 96 - 97 ja savi + CaO - seokseen kaivovälille 93 - 95 (liite 6).

Salaojan ympärysaineiden vaikutus raudan saostumiseen salaojaputkessa
Jatkotutkimukset



Kuva 14. Elektrodiensijainti salaojapöikkileikkauksessa.



Kuva 15a. Yhden mittauspisteen elektrodit vasemmalta oikealle: Redox-, lämpötila- ja kosteuselektrodi

Kuva 15b. Redox-elektrodi valmiina asennettavaksi ympärysaineeseen. Kuvassa on mittauskärkeä suojaava muovitulppa vielä paikallaan (kuva Hannu Autio).

6.2.2 Jepuan alikulku

Jepualle, Seinäjoen - Kokkolan välisen rautatien ja Jepuan-Lassfolkin maantien 739 risteyskohtaan, rakennetaan kevään -94 aikana vastaavanlainen koerakenne kuin Ouluunkin.

Kohteen maaperä on savea 0...2.0 m syvyydeltä ja hiekkaa, hiekkamoreenia tai siltistä hiekkaa 2.0 m:stä salaojitussyvyyteen saakka. Rautapitoisuudet koekairausyvyydellä olivat korkeita - 300...1020 mg/kg eli Oulun kohteeseen verrattuna pitoisuudet olivat kymmenkertaiset. Jepualle suunnitellun koerakenteen kuivatusjärjestelyt on kuvattu liitteen 7 suunnitelmassa.

6.3 Seurantamittaukset

Laholaisen leikkauksen ja Jepuan alikulun koepisteiden (yhteensä 6 kpl) seurantamittaukset käynnistyvät koerakenteiden valmistuttua. Koerakenteista mitataan redoxpotentiaalia, lämpötilaa ja ympärysaineen vesipitoisuutta. Redox -mittauksessa käytetään maastokäyttöön tarkoitettua Portamess 752 Calimatic -mittaria. Lämpötilaa mitataan maastokäyttöön tarkoitettulla lämpömittarilla (Beamex), jossa on kytkentä mittaussondista tulevaa kaapelia varten. Vesipitoisuutta seurataan Tektronix 1502B TDR -kaapelitutkalla. Salaojaputkistossa virtaavan veden määrää voidaan mitata salaojalinjaston päähän asennettavalla kippiastiamittarilla ja siihen liitettävällä laskurilla. Salaojakaivoista voidaan myös ottaa vesinäytteitä pH:n ja raudanmääritystä varten.

Mittauksia suoritetaan noin kymmenen kertaa vuodessa kuitenkin niin, että aikoina, jolloin salaojaputkistossa vedenvirtaus on suurimmillaan, peräkkäisten mittausten välit ovat lyhemmät kuin vedenvirtauksen ollessa vähäistä. Seurantamittaukset jatkuvat vuoteen 1997.

Koesarjan ensimmäiset mittaukset tehtiin 26.11.1993 (taulukko 5). Mittaustuloksina saatiin suoraan salaojalinjan lämpötila ja redoxpotentiaali. Kaapelitutkan antamasta sondin alku- ja loppupisteen etäisyydestä laskettiin dielektrisyysvakio ja sen avulla volumetrinen vesipitoisuus w_{vol} .

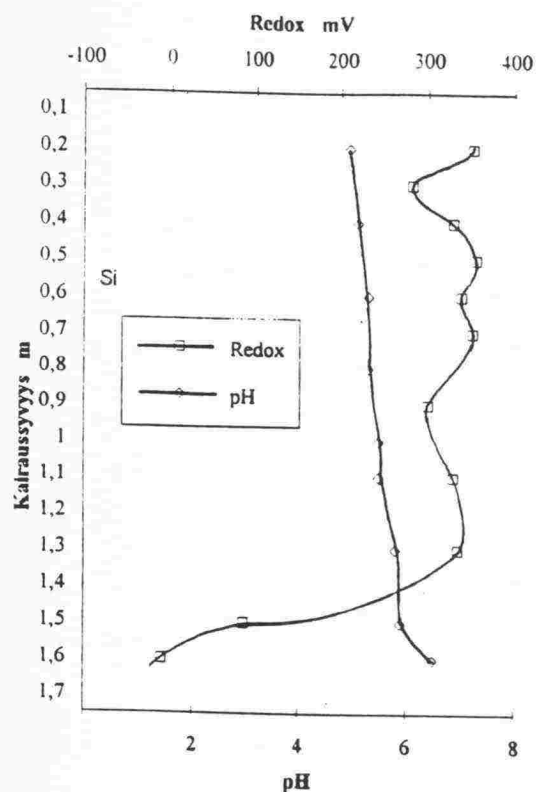
Taulukko 5. Laholaisen leikkauksen mittaustulokset 26.11.1993

mittauspiste / mitattava suure	mittauspiste 1 ferrokromikuona	mittauspiste 2 salaojasora	mittauspiste 3 savi + CaO
redoxpotentiaali mV	41	563	15
lämpötila °C	3.2	3.0	3.2
w_{vol} %	48.6	28.2	-

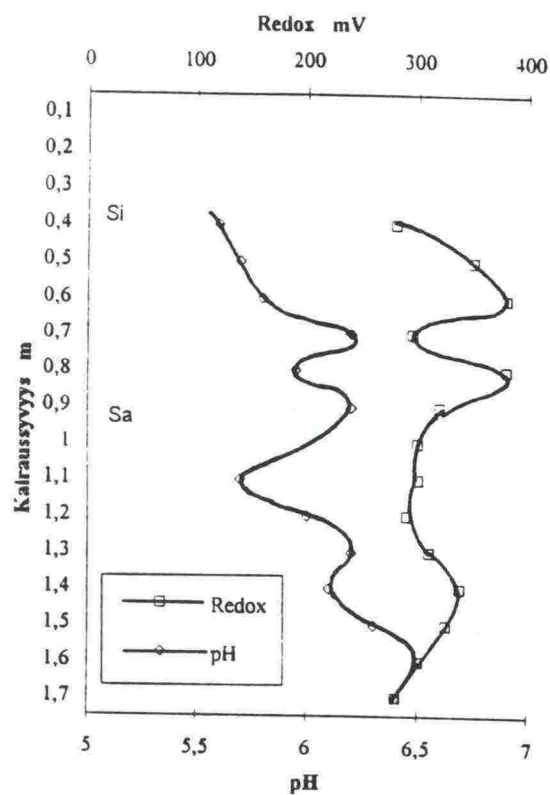
Savi + CaO -seoksen kaapelitutkamittaus antoi tulokseksi vain sondin väli-kaapelin pituuden. Ilmeisesti ympärysaine oli niin kuivaa, että sondi ei reagoanut lainkaan. Mittausten perusteella voitiin todeta kaikkien sondien olevan toimintakunnossa.

Rimmin ja Holmin tutkimuskohteiden Redox (Eh)- ja pH-profiilit

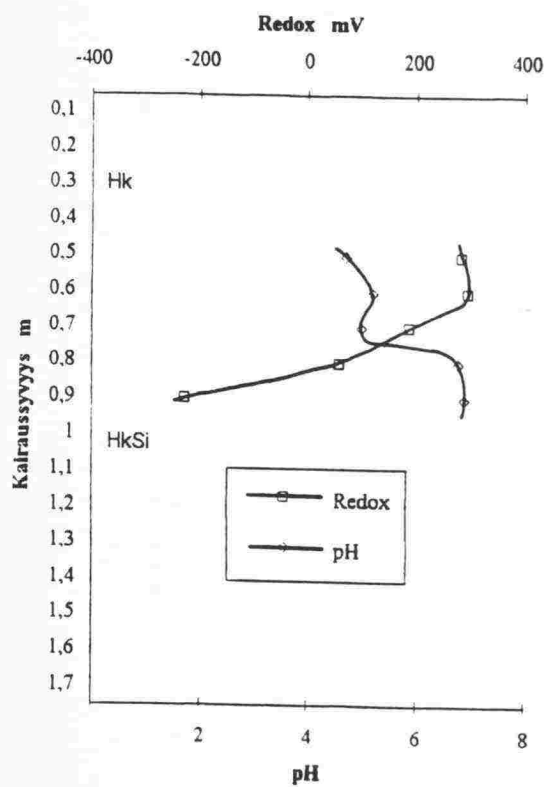
Rimmi 1



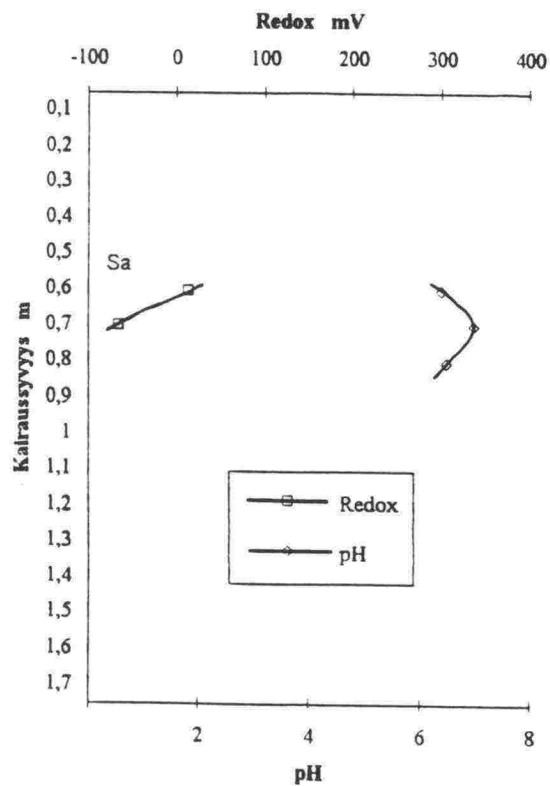
Rimmi 2



Holm 1

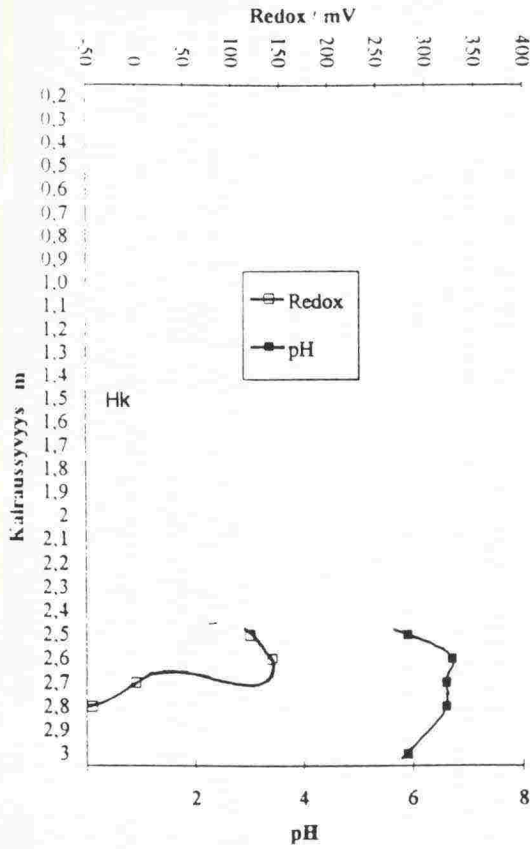


Holm 2

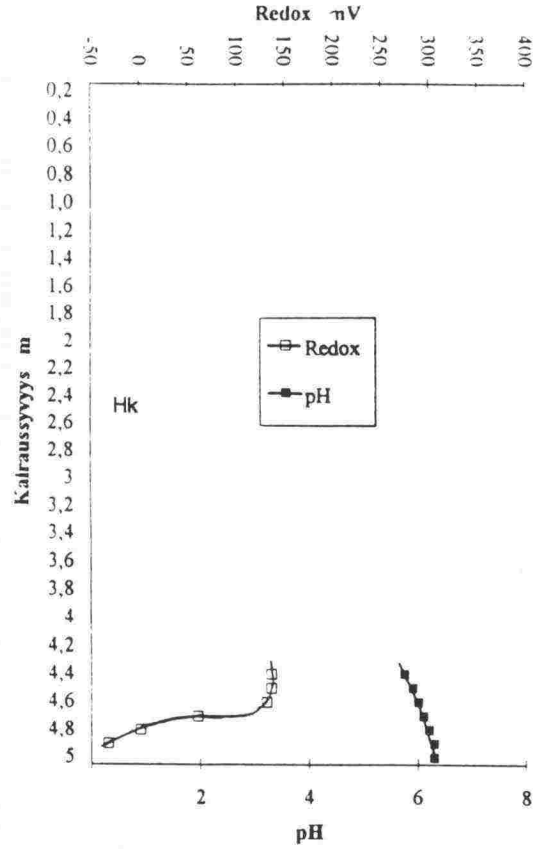


Oulun ja Jepuan tutkimuskohteiden Redox (Eh)- ja pH-profiilit

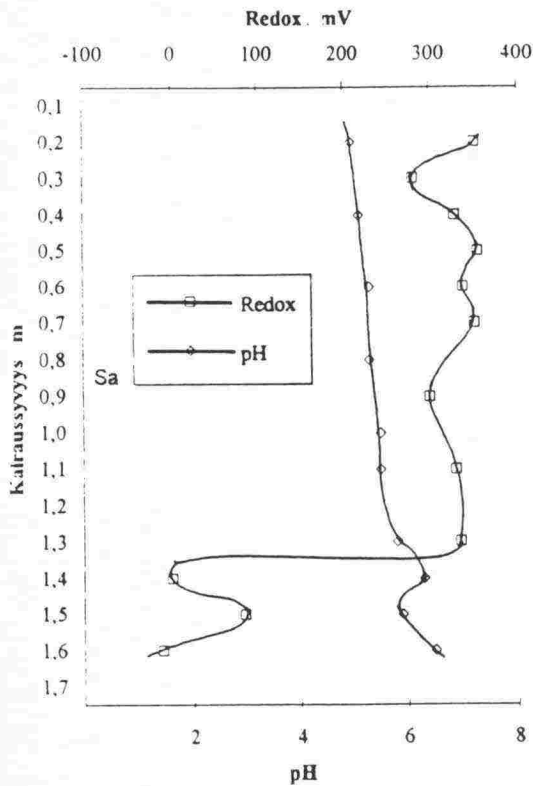
Laholainen 1



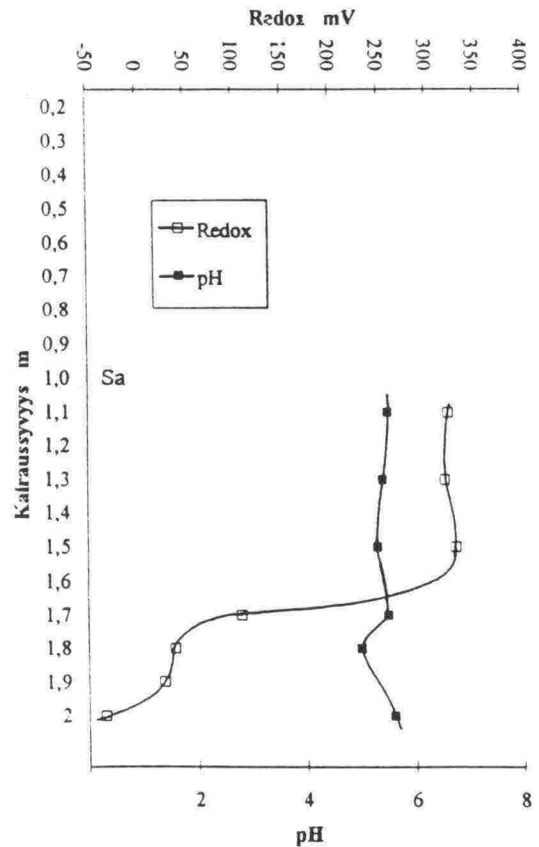
Laholainen 2



Jepua 1

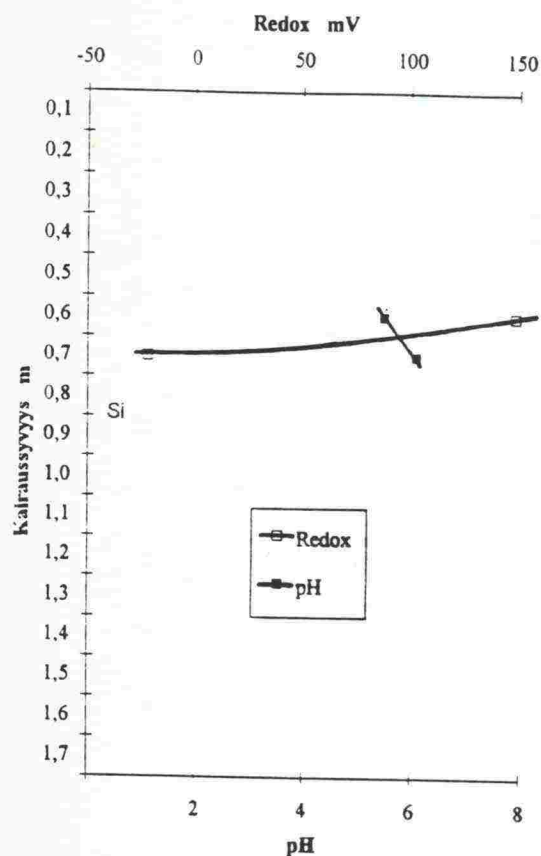


Jepua 2

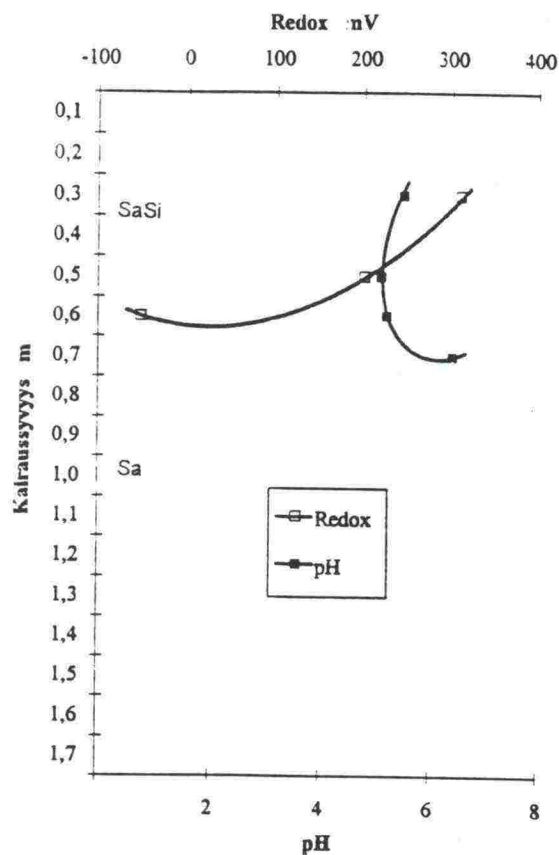


Ventuksen ja Närvilän tutkimuskohteiden Redox (Eh)- ja pH-profiilit

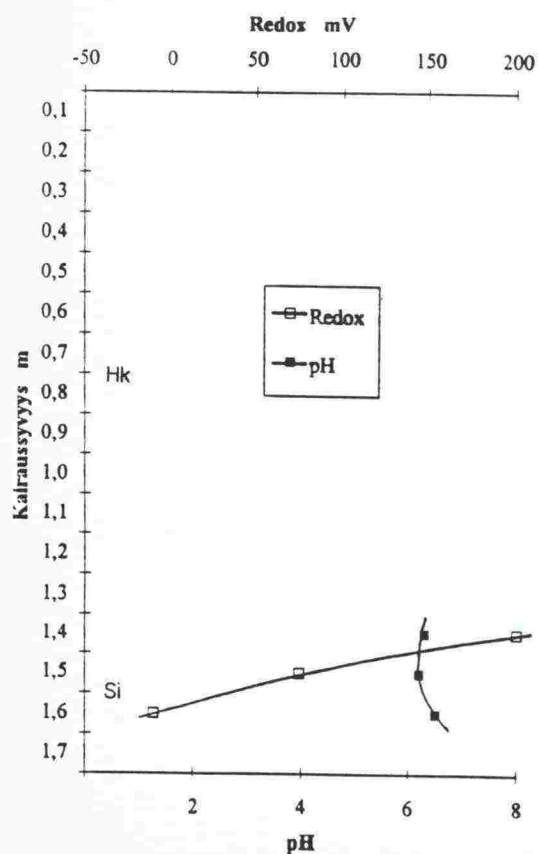
Ventus 1



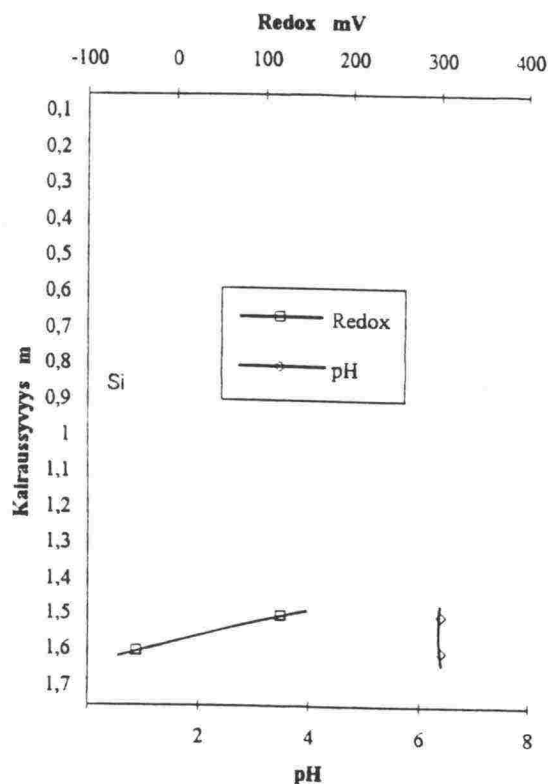
Ventus 2



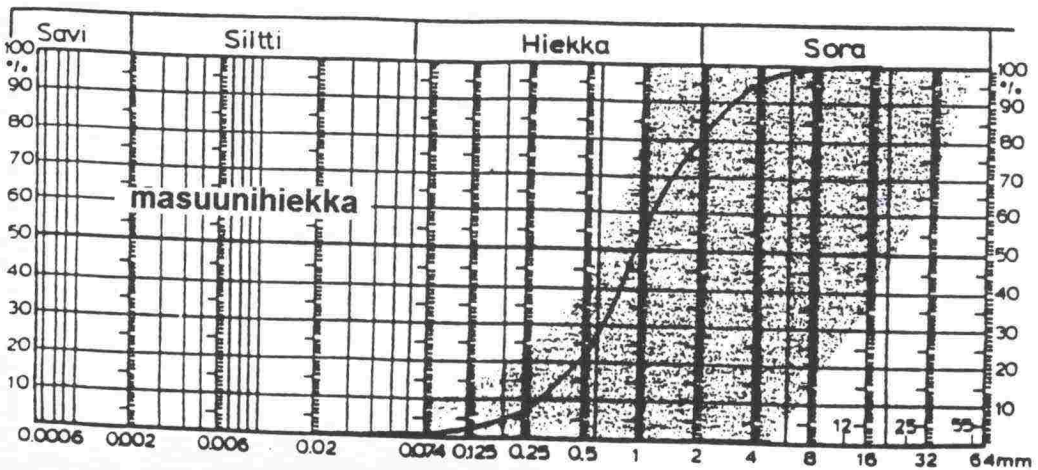
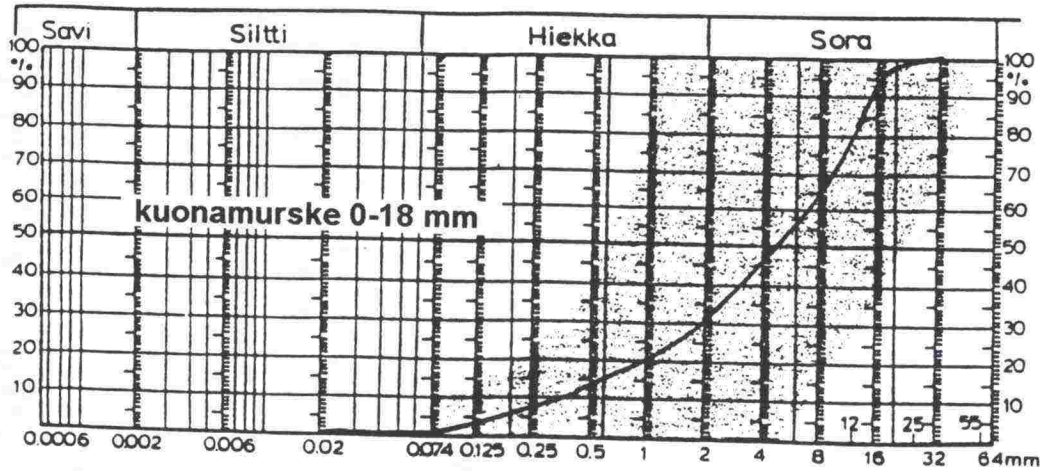
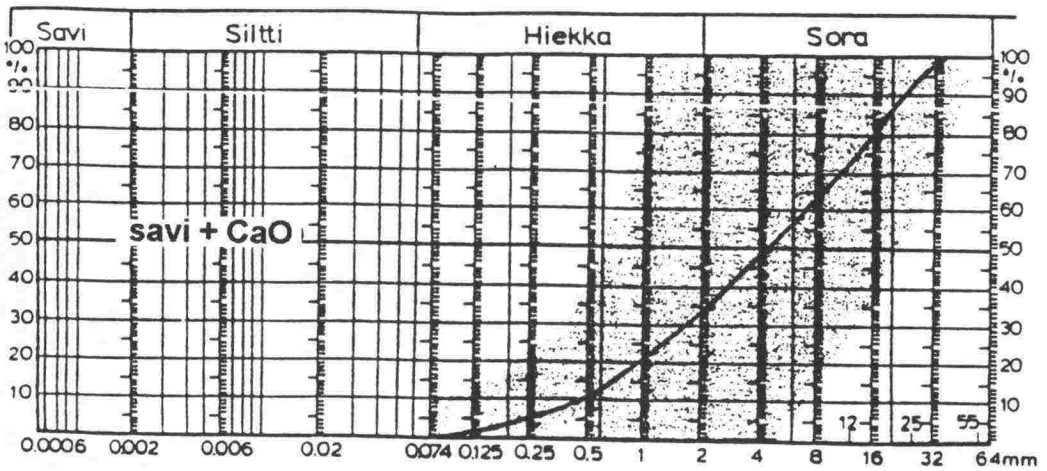
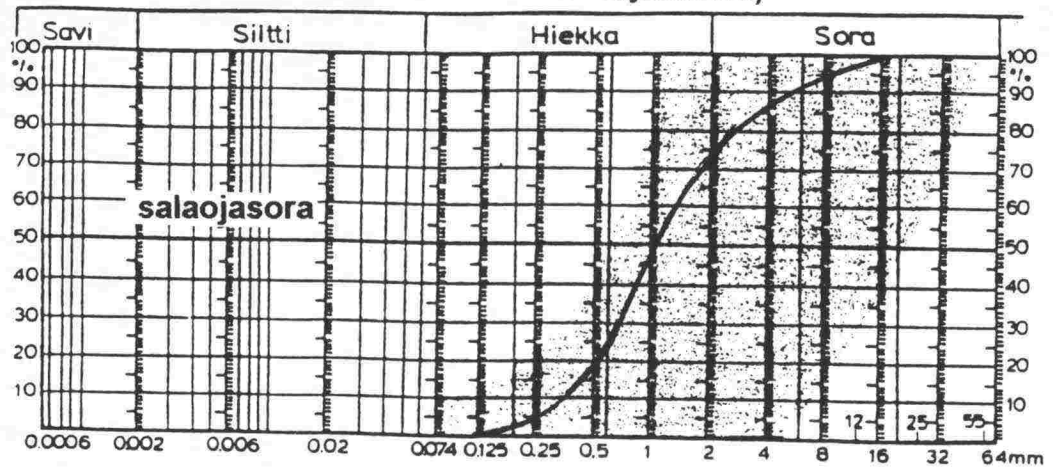
Närvilä 1

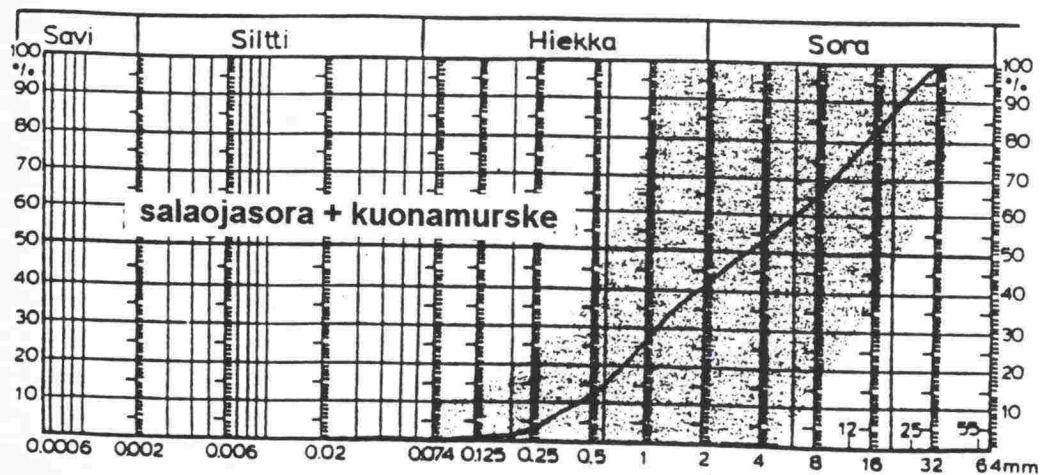
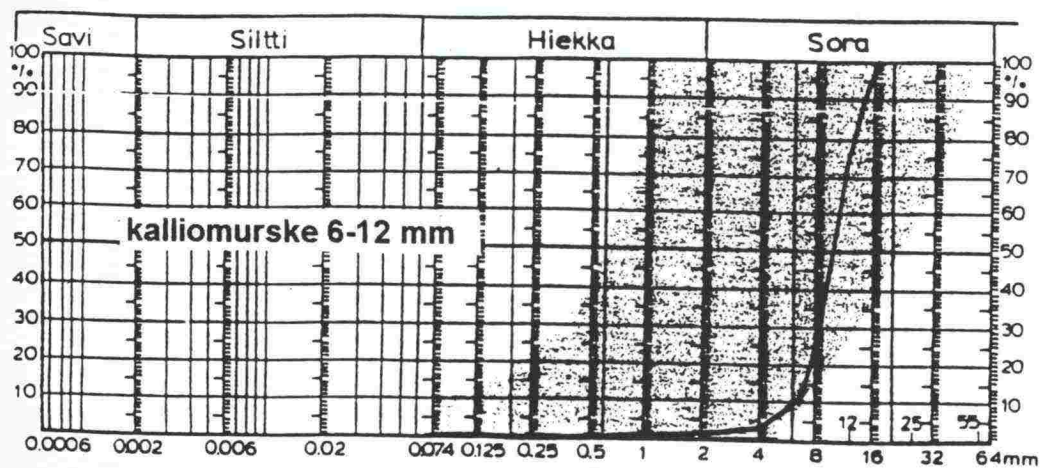
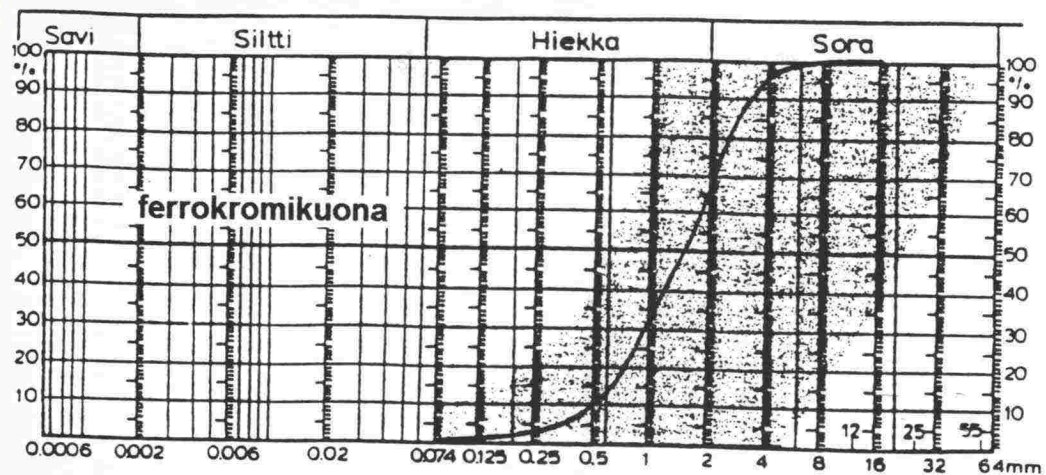


Närvilä 2

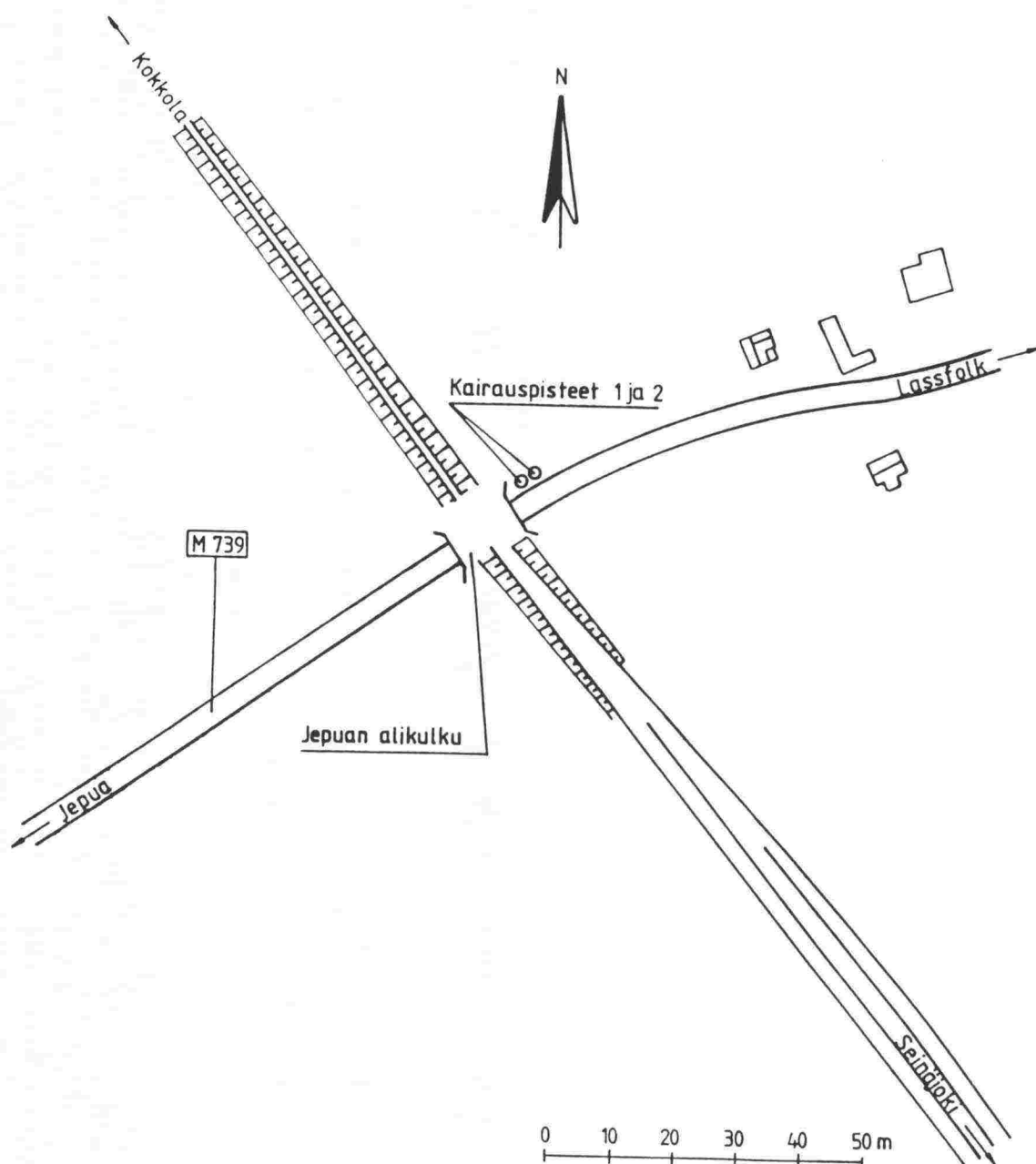


Ympärysmateriaalien rakeisuuskäyriä (rasteroitu alue kuvaa tielaitoksen salaojasoralle määrittämää rakeisuuden ohjealuetta)

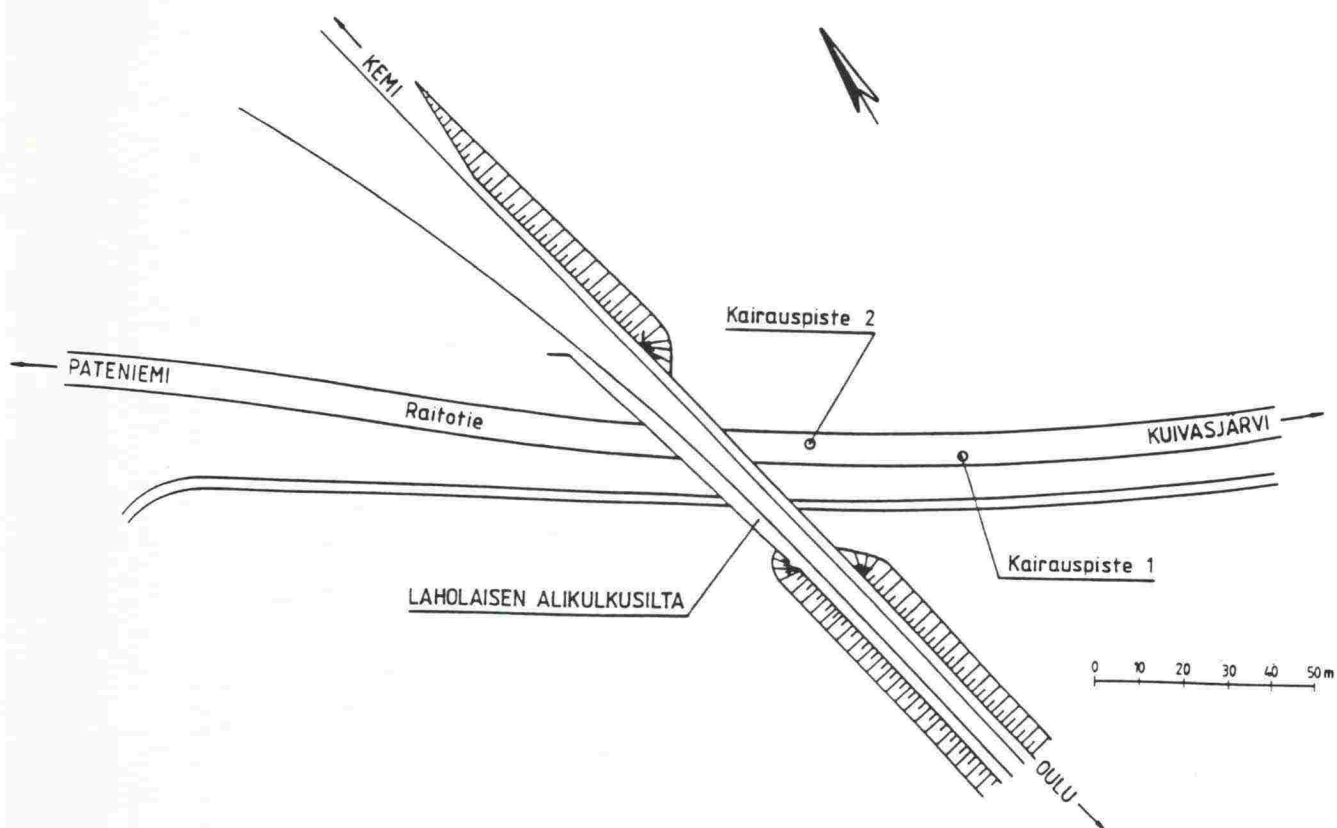




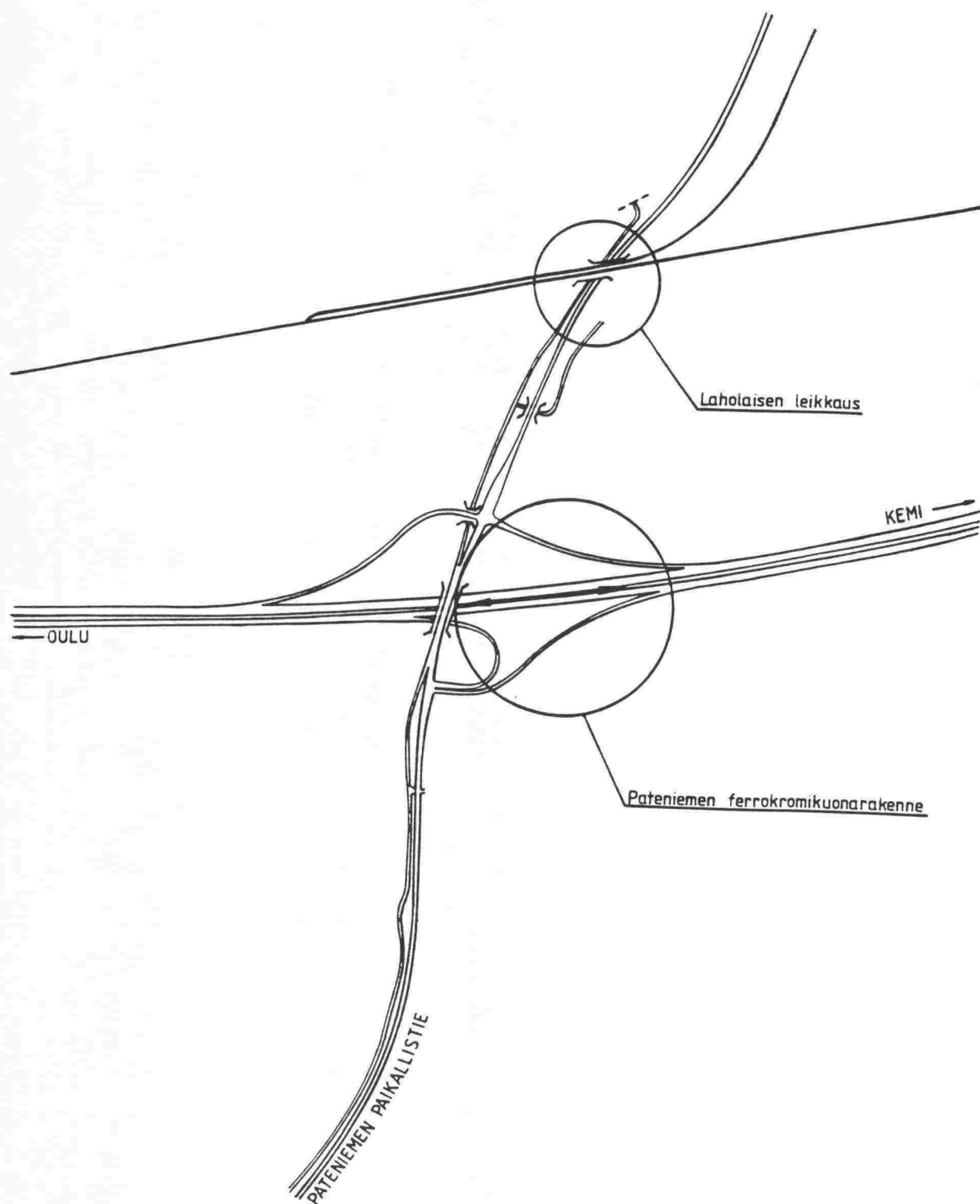
Jepuan tutkimuskohteen kairauspisteiden sijainti



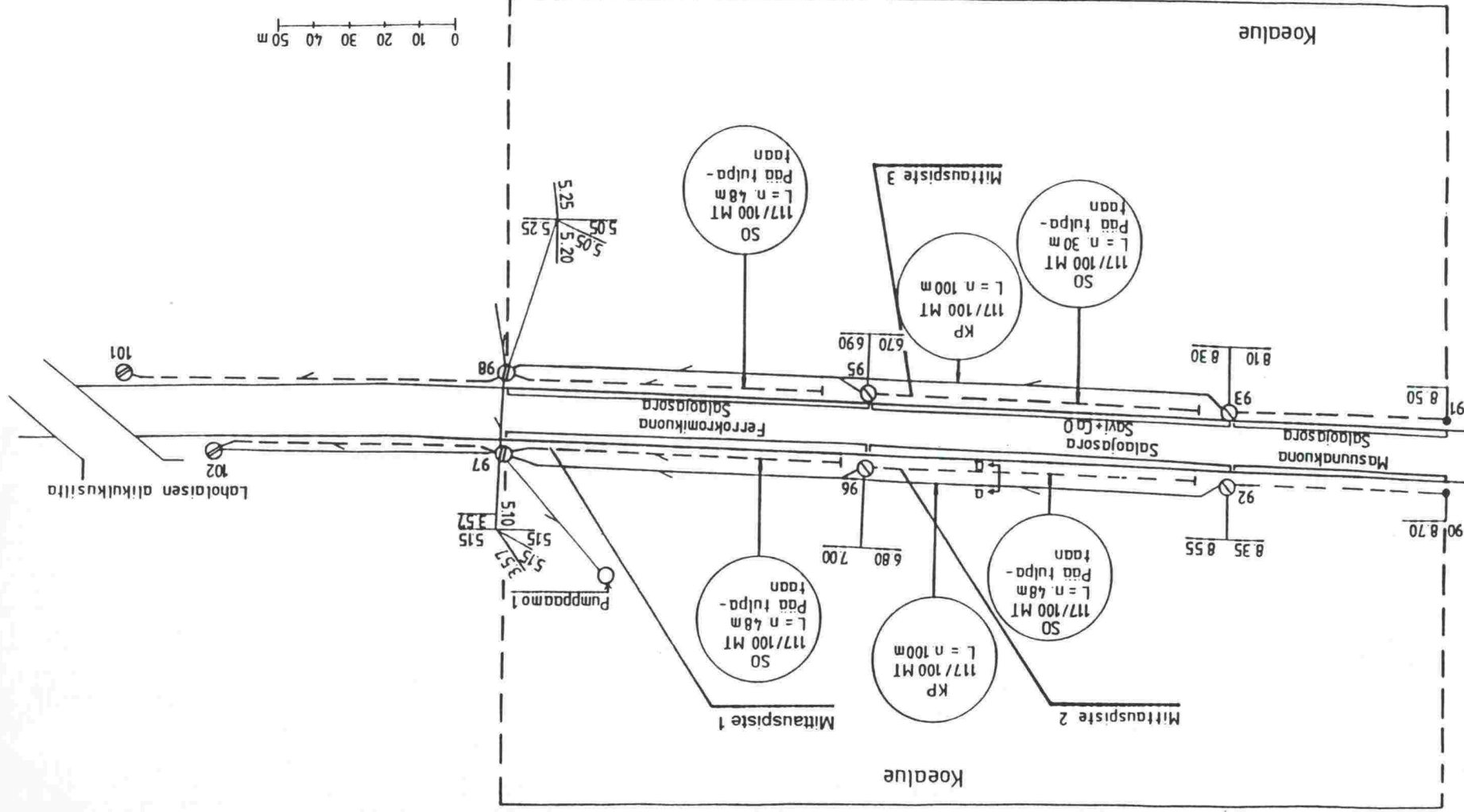
Oulun tutkimuskohteen kairauspisteiden sijainti



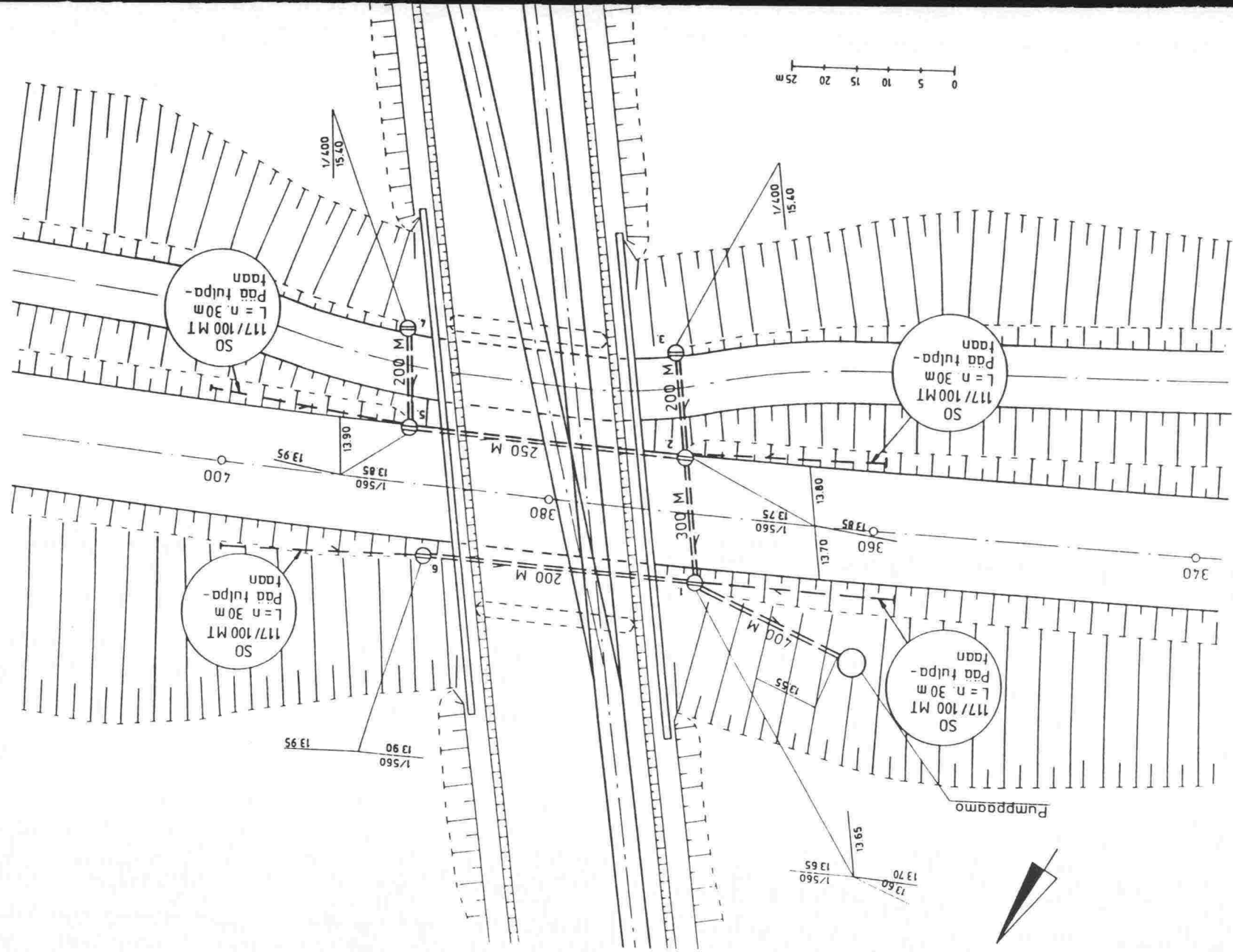
Ferrokromikuonarakenteen sijainti VT 4:n eritasoliittymässä Oulun Pateniemessä



Laholaisen leikkauksen koejärjestelyt Oulun Pateniemessä



Jepuan alikulun kuivatussuunnitelma ja suunnitellut koerakenteet



7 Kirjallisuus

Bear, J. & Verruijt, A.; Modelling groundwater flow and pollution. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1987. ISBN 1-55608-014.X

Bouwer, H., Groundwater Hydrology, First Ed. McGraw-Hill Book Company, 1978. ISBN 0-07-006715-5.

Green & Corey, 1971, Calculation of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods, Soil Science Society of America proceedings, vol 35, pp 3-8

Harju-Autti, P., Masuunihiekan hydrauliset ominaisuudet, Diplomityö, Oulun Yliopisto, 1993

Olsen Grant, R. & Andersen, A., Forsog med draeningsmaterialer og dykkede draen på okkerholdig jord, Hedeselskabet Forsogsvirksomheden, Beretning n:o 29, 1985.

Palko, J. 1991. Kalkin ja rikinpoistotuotteen käyttö savimaan vedenläpäisevyyden parantamisessa ja ravinteiden pidättämisessä. Oulun vesi- ja ympäristöpiirin julkaisuja.

Palko, J., Merilä, E., Heino, S. 1988. Kuivatuksen suunnittelu happamilla sulfaattimailla. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja 21.

Peteri, K., Salaojan ympärysaineiden vaikutus okrasaostumien syntyyn, Diplomityö, Oulun yliopisto, 1994.

Suomen Kuonajaloste (SKJ-yhtiöt), esitemateriaali 1993

Tielaitos, 1992, Rautasaostuman aiheuttama salaojan tukkeutuminen ja toimenpiteet tukkeutuman estämiseksi, TIEL 3200110, Tielaitoksen selvityksiä 60/1992, Kuopio, ISBN 951-47-6629-6.

Tielaitos, 1993, Kansio B, osa IV: Kuivatus, syväkuivatuksen suunnittelu, Tie- ja Vesirakennushallitus. Helsinki.

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 68/1993 Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 69/1993 HLFM-maankäyttömalli, esiselvitys. TIEL 3200194
- 70/1993 Kalsiumkloridin käyttö tierakenteessa; Kirjallisuusselvitys ja laboratoriokokeet. TIEL 3200195
- 71/1993 Nonwoven Geotextiles in Road Constructions. TIEL 3200193E
- 72/1993 Yleisten teiden tilaselvitys; Meluntorjunta tiepiireissä. TIEL 3200196
- 73/1993 Valaistus taajamissa; Kuuden kohteen inventointi ja analysointi johtopäätöksineen. TIEL 3200197
- 74/1993 Dynaaminen rasitusindeksi (DRI). TIEL 3200198
- 75/1993 Pientieverkon kunnossapidon kehittäminen. TIEL 3200199
- 76/1993 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus. TIEL 3200200
- 77/1993 Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201
- 78/1993 Etelä-Suomen emulsiokoetiet 1993. TIEL 3200202
- 79/1993 Emulsiopäällystekokeilut 1992-1993. TIEL 3200203
- 80/1993 Kelin vaikutus ajokäyttäytymiseen ja liikennevirran ominaisuuksiin. TIEL 3200204
- 81/1993 Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi; tutkimusraportti. TIEL 3200205
- 82/1993 Emulsiopäällysteiden suunnittelu ja rakentaminen. TIEL 3200206
- 83/1993 Tutkimus pölyntorjunnasta murskaamoilla. TIEL 3200207
- 84/1993 Kuusamon keskustan liikennejärjestelut ja ympäristö; Yleissuunnittelu asukkaiden näkökulmasta. TIEL 3200208
- 85/1993 Kuusamon keskustan liikennejärjestelyt ja ympäristö; Yleissuunnittelun osallistumismenettely. TIEL 3200209
- 86/1993 Teiden suolauksen vähentäminen Kuopion tiepiirissä; Vaikutukset talvella 1992-1993. TIEL 3200210
- 87/1993 Ajokäyttäytyminen kaarre- ja jonoajossa. TIEL 3200212
- 88/1993 Tielaitoksen liikenteen informaatiopalvelujen kehittämistutkimus. TIEL 3200215
- 1/1994 Suunnittelustrategia. Tiehallinto
- 2/1994 Ihminen ja tie; Tien kokeminen ja tie kirjallisuudessa. TIEL 3200211
- 3/1994 Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long-Term Pavement Performance (LTPP); Materiaalimodulin määrittäminen takaisinlaskentaohjelmilla sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit. TIEL 3200213